



**Universidade de  
Aveiro  
2015**

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**Gabriel Duarte  
Martins Barreiros**

**Monitorização das condições de operação de  
uma fornalha industrial a biomassa**



**Gabriel Duarte  
Martins Barreiros**

**Monitorização das condições de operação de uma  
fornalha industrial a biomassa**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos

o júri

**Presidente**

**Professor Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos**

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Aveiro

**Orientador**

**Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho**

Professor Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento – Universidade de Aveiro

**Arguente**

**Professor Doutor Fernando José Neto da Silva**

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Aos meus pais, pelas oportunidades que me deram, pelo apoio e valores transmitidos que me permitiram ser a pessoa que sou hoje.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho pelo apoio e disponibilidade prestados.

Ao orientador na empresa Campoaves-UTS, o Eng.º Rúben da Fonseca, por me ter proporcionado a oportunidade de realização do estágio e por toda a colaboração dada durante o período de estágio.

A todos os colaboradores da empresa Campoaves-UTS, pela disponibilidade, partilha de conhecimento e camaradagem concedidos.

Ao Eng.º Edgar da empresa Flucal, pela disponibilidade e informação disponibilizada relativa à fornalha industrial.

Ao João Perez por toda a ajuda disponibilizada durante a realização da atividade experimental.

A todos os meus amigos, pela amizade e apoio constante em todos os momentos da minha vida.

## palavras-chave

Combustão, combustível, cama de aviário, fornalha

## resumo

Este trabalho consistiu na caracterização das condições de operação de uma fornalha industrial que usa como combustível cama de aviário.

A cama de aviário é um subproduto proveniente de explorações avícolas, que pode ser usado em instalações de combustão para a produção de energia térmica ou elétrica. Apesar de não possuir um PCI muito elevado ( $9,1 \text{ MJ/kg}_{\text{bq}}$ ), este combustível é utilizado em grandes quantidades na fornalha industrial em estudo, permitindo a valorização de subprodutos provenientes de outras unidades industriais, além de ser vantajoso a nível ambiental.

A fornalha industrial a biomassa utiliza o processo de combustão para a conversão energética da biomassa. Os parâmetros operacionais, tais como o teor de humidade, PCI e composição do combustível, caudal de ar, caudal de combustível, temperatura, pressão, entre outros, influenciam o desempenho da fornalha e consequentemente a quantidade de vapor de água produzido. O vapor de água produzido é utilizado no processo produtivo.

Esta instalação de combustão está na sua fase inicial de operação e como tal é necessária a otimização das condições de funcionamento, de modo a garantir uma eficiente utilização do recurso biomassa e contribuir para o aumento da vida útil da instalação.

Do trabalho realizado, conclui-se que é importante o controlo da qualidade do combustível, o ajuste da frequência de funcionamento das grelhas, caudal de ar de combustão insuflado nas diferentes zonas da fornalha, distribuição de temperaturas, de modo a promover um bom desempenho energético e ambiental da instalação de combustão. É benéfico o controlo das condições de operação, de modo a favorecer também a produção de vapor.

**keywords**

Combustion, fuel, poultry litter, furnace

**abstract**

This work consisted in characterizing the operating conditions of an industrial furnace using poultry litter as fuel.

The poultry litter is a byproduct from poultry farms, which can be used in combustion plants for the production of thermal or electric energy. Despite not having a very high PCI ( $9.1 \text{ MJ/kg}_{\text{btq}}$ ), this fuel is used in large quantities in industrial furnace under study, allowing the valuation of by-products from other industrial units as well as being beneficial for environmental protection.

The industrial furnace process uses biomass combustion energy conversion of biomass. The operating parameters, such as moisture content, PCI, fuel composition, air flow, fuel flow, temperature, pressure, etc., influence the performance of the furnace and consequently the amount of produced water vapor. The generated steam is used in the production process.

This combustion plant is at the initial stage of operation and as such it is necessary to optimize operating conditions in order to ensure efficient resource utilization and biomass contributes to increasing the useful life of the installation.

From work done, it is concluded that it is important to control the quality of the fuel adjusting the operating frequency of the grids, combustion air flow blown in the different zones of the furnace, temperature distribution, in order to promote a good energy performance and environmental combustion plant. It is beneficial to control operating conditions so as to also favor the production of steam.

## Índice

Índice de figuras .....	iii
Índice de tabelas .....	v
Nomenclatura .....	vi
Abreviaturas .....	vi
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento e objetivos .....	2
1.2. Tecnologias de conversão de biomassa .....	3
1.2.1. Combustão de biomassa .....	3
1.3. Tecnologias de combustão de biomassa e consequente geração de vapor .....	4
1.3.1. Combustão em leito fixo .....	4
1.3.2. Combustão em leito fluidizado .....	5
1.3.3. Produção de vapor em caldeiras .....	5
1.4. Propriedades da biomassa que influenciam o processo de combustão .....	6
1.4.1. Teor de humidade .....	6
1.4.2. Poder calorífico .....	7
1.4.3. Teor em cinzas .....	8
1.4.4. Conteúdo em voláteis .....	8
1.4.5. Composição elementar .....	8
1.5. Emissão de gases na combustão de biomassa .....	9
1.5.1. Enquadramento legal relativo às emissões em Portugal .....	10
2. Entidade de acolhimento: Campoaves-UTS .....	13
2.1. Descrição da instalação de combustão e respetivos sistemas auxiliares .....	14
2.1.1. Sistema de alimentação de combustível .....	15
2.1.2. Sistema de alimentação de ar de combustão .....	15
2.1.3. Fornalha/caldeira .....	16
2.1.4. Sistema de alimentação de água .....	16
2.1.5. Sistema de exaustão e tratamento de efluentes gasosos .....	17
2.1.6. Sistema de descarga/recolha de cinzas .....	17
2.1.7. Sistema de monitorização e controlo de operação da instalação .....	18
2.1.8. O coletor .....	18
2.2. Características técnicas .....	19
2.3. Integração da instalação de combustão no processo produtivo da fábrica .....	19
3. Caracterização das condições de operação da fornalha industrial .....	21
3.1. Caracterização do combustível .....	21
3.1.1. Poder calorífico inferior do combustível .....	22
3.1.2. Granulometria do combustível .....	23
3.1.3. Determinação do teor de humidade do combustível .....	23
3.1.4. Determinação do caudal de combustível .....	25
3.2. Caracterização do ar de combustão .....	26
3.2.1. Determinação do caudal de ar de combustão .....	27
3.3. Caracterização da combustão .....	27
3.3.1. Medição de temperatura nos diferentes pontos da fornalha .....	27
3.3.2. Emissão de gases .....	29
3.4. Operação da instalação de combustão .....	31
3.5. Avaliação do rendimento da fornalha .....	32



3.6.	Produção de cinzas .....	33
3.6.1.	Determinação do teor de humidade e de inqueimados.....	34
4.	Resultados da monitorização da instalação de combustão.....	35
4.1.	Registo de consumo de combustíveis e produção vapor.....	35
4.1.1.	Consumo de combustíveis .....	35
4.1.2.	Produção de vapor .....	36
4.2.	Temperaturas, frequência da alimentação de biomassa e frequência insuflação de ar de combustão .....	38
4.3.	Utilização de diferentes combustíveis .....	40
4.3.1.	Cama de aviário com estilha .....	40
4.3.2.	Utilização da cama de aviário.....	43
4.4.	Influência do teor de humidade do combustível .....	45
4.4.1.	Armazenamento da biomassa em pilha .....	46
4.4.2.	Perda de humidade do combustível ao longo do sistema de alimentação .....	48
4.5.	Análise da amostra de cinzas.....	49
4.6.	Emissões de gases.....	50
4.7.	Balanços de massa e de energia ao sistema de combustão .....	51
4.8.	Problemas comuns na fornalha .....	53
5.	Sugestões para melhoria das condições de operação da instalação de combustão e respetiva produção de vapor .....	57
5.1.	Combustível.....	57
5.1.1.	Limpeza regular dos sem fins de transporte de combustível à caldeira .....	57
5.2.	Modificação do sistema de alimentação.....	58
5.3.	Distribuição das temperaturas ao longo da fornalha .....	58
5.4.	Otimização do funcionamento da fábrica/regime de operação da instalação.....	59
5.5.	Aumento da pressão do vapor na fornalha/caldeira.....	59
5.6.	Instalação de um sistema de tratamento de efluentes gasosos mais eficiente .....	60
5.7.	Diminuição da extensão do percurso efetuado pelo vapor .....	61
5.8.	Formação dos operadores.....	63
6.	Conclusões.....	65
	Bibliografia.....	67
	ANEXOS.....	69
	Anexo 1 - Determinação do teor de inqueimados.....	70

## Índice de figuras

Figura 1 - Geração de energia por fonte de energia renovável (IEA, 2009).....	1
Figura 2 - Fornalha de grelhas móveis (Loo et al, 2008). ....	4
Figura 3 - Variação do PCI e do PCS com o teor de humidade (Gonçalves, 2002).....	7
Figura 4 - Descrição generalizada do processo produtivo.....	13
Figura 5 – Instalação de combustão e principais componentes que a integram .....	14
Figura 6 - Trolha de receção do combustível. ....	15
Figura 7 - Ventiladores de insuflação de ar de combustão primário (a) e secundário (b). ....	16
Figura 8 – Aspeto do economizador. ....	17
Figura 9 - Supervisão das diferentes zonas da instalação de combustão.....	18
Figura 10 - Coletor de vapor da caldeira antes da distribuição para a caldeira .....	19
Figura 11 - Amostra de cama de aviário utilizada na caracterização. ....	21
Figura 12 - Diferença entre o combustível mais húmido e mais seco. ....	22
Figura 13 – Analisador de humidade. ....	24
Figura 14 - Mostrador digital da balança.....	26
Figura 15 - Corpo da caldeira e respetiva localização das sondas de medição de temperatura. ....	28
Figura 16 – Medidor de temperatura.....	29
Figura 17 - Sonda de medição de gases inserida na tubagem de transporte dos gases de exaustão. ....	30
Figura 18 - Cinzas fundidas resultantes da combustão de cama de aviário. ....	33
Figura 19 - Produção média diária de vapor pela caldeira, pressão do vapor na caldeira e pressão do vapor no coletor.....	37
Figura 20 - Produção média mensal de vapor pela caldeira. ....	37
Figura 21 - Evolução das temperaturas, frequência do sem fim de alimentação de biomassa (direito e esquerdo) (FSFABD e FSFABE) e frequência do ventilador de insuflação de ar de combustão (primário e secundário) (FVIACP e FVIACS) ao longo de um dia normal de funcionamento da fornalha com cama de aviário. ....	39
Figura 22 - Evolução das temperaturas, frequência de insuflação de ar de combustão (primário e secundário) (FVIACP e FVIACS) e do sem fim de alimentação de biomassa (esquerdo e direito) (FSFABD e FSFABE) ao longo de um dia normal de funcionamento da fornalha. durante a queima de estilha. ....	40
Figura 23 - Comportamento dos diversos componentes gasosos ( $O_2$ , $CO_2$ , $SO_2$ , $CO$ e $NO$ ) presentes nos gases de exaustão, razão estequiométrica e temperaturas durante a combustão de cama de aviário com estilha.....	42
Figura 24 - Comportamento dos diversos componentes gasosos ( $O_2$ , $CO_2$ , $SO_2$ , $CO$ e $NO$ ) presentes nos gases de exaustão, da razão estequiométrica e das temperaturas durante a combustão da cama de aviário. ....	44
Figura 25 – Influência do teor de humidade nas temperaturas da fornalha. ....	45
Figura 26 - Influência do teor de humidade da biomassa sobre o tempo de paragem do parafuso sem fim (PSF) de transporte de biomassa à fornalha. ....	46
Figura 27 - Planta do pavilhão de armazenamento de biomassa e respetivos níveis de armazenamento estudados.....	47
Figura 28 - Cama de aviário "carbonizada". ....	48
Figura 29 - Localização dos pontos de recolha da amostra de biomassa.....	49
Figura 30 - Balanço de massa. ....	52
Figura 31 - Balanço de energia. ....	53
Figura 32 - Pormenor da deposição de sujidade no parafuso sem fim de extração de biomassa. ....	58
Figura 33 - Altura de chama (à esquerda na situação de desligar por pressão e à direita em funcionamento normal).....	60

Figura 34 - Pormenor da deposição de partículas na tubagem de transporte dos gases de exaustão.....	61
Figura 35 - Percurso efetuado pelo vapor (indicado pelas setas), estando os pontos de 1 a 6 referenciados na Tabela 18.....	62

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Valores de PCI de diferentes tipos de biomassa a nível nacional (Costa, 2005).....	8
Tabela 2 - Características de alguns tipos de biomassa (Silva, 2009).....	9
Tabela 3 - Impactos provocados pelos diferentes constituintes do efluente gasoso (Loo et al, 2008). ....	10
Tabela 4 - Valores Limite de Emissão para os poluentes mais comuns (Portaria nº675/2009, de 23 de junho).....	11
Tabela 5 - Valores Limite de Emissão para os poluentes mais comuns (Portaria nº677/2009, de 23 de junho).....	11
Tabela 6 - Características técnicas dos diversos componentes da instalação de combustão...	19
Tabela 7 - Composição de diferentes tipos de cama de aviário (Sanches, 2007; Tarelho, 2014). ....	22
Tabela 8 - Características técnicas do aparelho de medida. ....	24
Tabela 9 - Valores de humidade de algumas amostras de biomassa. ....	25
Tabela 10 - Exemplo da variação das temperaturas na fornalha com a utilização de diferentes combustíveis.....	28
Tabela 11 - Gamas de análise do aparelho de medição. ....	31
Tabela 12 – Consumo de biomassa (estilha e cama de aviário) pelas fornalhas e de gás natural pelas outras caldeiras. ....	35
Tabela 13 - Valores obtidos resultantes da análise de uma amostra de cinzas (empresa externa). ....	50
Tabela 14 - Valores medidos de alguns componentes presentes na amostra de gás (empresa externa). ....	51
Tabela 15 - Valores médios utilizados para o balanço mássico. ....	52
Tabela 16 - Valores médios utilizados para o balanço energético. ....	53
Tabela 17 - Principais problemas resultantes do funcionamento da fornalha. ....	54
Tabela 18 - Pontos de medição de temperatura e respetivos valores obtidos. ....	62
Tabela 19 – Proposta para solução do problema. ....	63

## Nomenclatura

bs	Base seca	[-]
bssc	Base seca sem cinzas	[-]
btq	Base tal e qual	[-]
$C_p$	Calor específico	[kJ/(kg.K)]
F	Frequência	[Hz]
h	Coeficiente de convecção	[W/m <sup>2</sup> .°C]
$h_{H_2O}$	Entalpia da água à pressão P e temperatura T	[kJ/kg]
$h_{vapor}$	Entalpia do vapor saturado à pressão P e temperatura T	[kJ/kg]
L	Comprimento da tubagem	[m]
K	Condutividade térmica	[W/m.°C]
%m	Percentagem em massa	[-]
P	Potência	[kW]
PCI	Poder calorífico inferior	[MJ/kg]
PCS	Poder calorífico superior	[MJ/kg]
ppm	Partes por milhão	[-]
Q	Calor	[kW]
R	Resistência	[°C/W]
T	Temperatura	[°C]
$W_{CR}$	Fração mássica de carbono no combustível em bs	[-]
$W_{OR}$	Fração mássica de oxigénio no combustível em bs	[-]
$W_{NR}$	Fração mássica de azoto no combustível em bs	[-]
$W_{SR}$	Fração mássica de enxofre no combustível em bs	[-]
$W_{ZR}$	Fração mássica de cinzas no combustível em bs	[-]

## Abreviaturas

ca	Cama de aviário
CLF	Combustão em leito fluidizado
CLFi	Combustão em leito fixo
em	Estilha de madeira
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
FPSFABD	Frequência do parafuso sem fim de alimentação de biomassa direito
FPSFABE	Frequência do parafuso sem fim de alimentação de biomassa esquerdo
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GMI	Grelha móvel inferior
GMS	Grelha móvel superior
LFB	Leito Fluidizado Borbulhante
LFC	Leito Fluidizado Circulante
nd	Não detetado
Nd	Não determinado
TF1	Temperatura fornalha 1
TF2	Temperatura fornalha 2
TF3	Temperatura fornalha 3
TF4	Temperatura fornalha 4
VE	Ventilador de extração
VIACP	Ventilador de insuflação de ar de combustão primário
VIACS	Ventilador de insuflação de ar de combustão secundário
VLE	Valores limite de emissão
vm	Valor medido

## 1. Introdução

A maior parte da energia é produzida no planeta é proveniente dos combustíveis fósseis. A utilização destes combustíveis gera grandes impactes a nível global, sendo que estes constituem uma questão central nas políticas ambientais a nível internacional que muitos países têm vindo a implementar.

A União Europeia (UE) tem assumido um percurso notável no que respeita à implementação de políticas ambientais, tendo alterado em grande parte a maneira como se age em relação ao ambiente que nos rodeia e o que queremos ter no futuro. Há uma necessidade urgente de reduzir os gases com efeito de estufa (GEE), nos países desenvolvidos, a fim de se atingir níveis de emissões que permitam minimizar as alterações climáticas em curso. Tendo em conta este facto a UE tem procurado cumprir as metas estabelecidas, como as acordadas no Protocolo de Quioto e noutros acordos internacionais. Para o cumprimento dessas metas são apontadas algumas áreas de intervenção que vão desde o aumento do consumo de energia proveniente de fontes renováveis, eficiência na produção e utilização da energia, através da implementação de novas tecnologias e melhoria das existentes e por último a captura e o armazenamento de CO<sub>2</sub>. Na Figura 1 evidencia-se uma previsão para geração de energia proveniente de fontes de energia renovável (hidroelétrica, eólica e biomassa) (IEA, 2009).

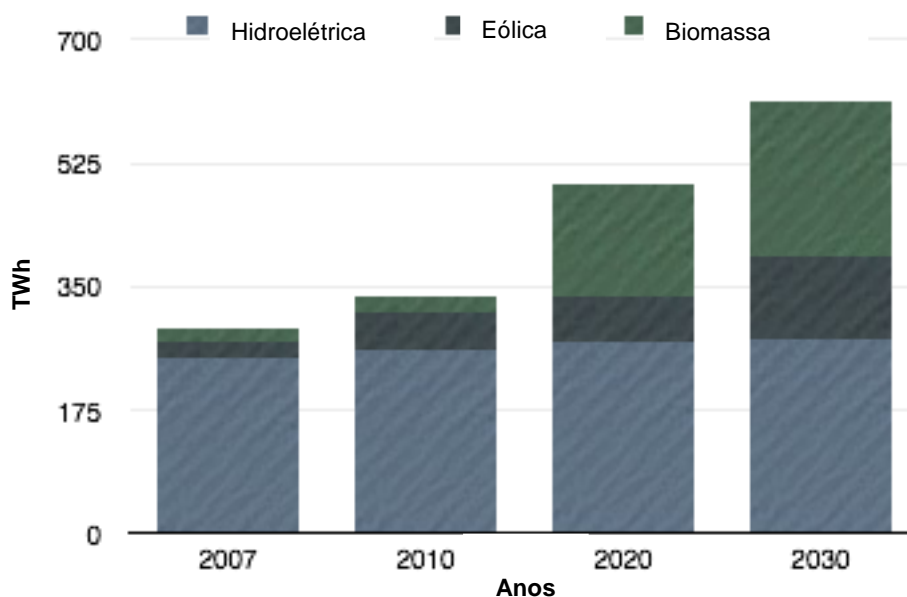


Figura 1 - Geração de energia por fonte de energia renovável (IEA, 2009).

No caso de Portugal, foi aprovada a Estratégia Nacional para a Energia 2020 (ENE 2020), que tem como objetivo a aposta em energias renováveis e eficiência energética, promovendo a competitividade, o crescimento e independência energética e financeira do país.

Apesar da crise que se tem feito sentir nos últimos anos, Portugal comprometeu-se através da ENE 2020 a aumentar a utilização de biomassa para a produção de energia até ao ano de 2020.

De referir que no contexto de produção de energia, o termo biomassa corresponde à fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias animais e vegetais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fração biodegradável de resíduos industriais e urbanos. Estes materiais podem ser usados em sistemas de combustão ou convertidos em biocombustíveis. De notar que a utilização de biomassa enquanto substituto de combustíveis fósseis, apresenta benefícios ambientais, no que respeita à mitigação das emissões de GEE. Quanto à combustão de biomassa, esta é neutra do ponto de vista de CO<sub>2</sub>. Este pressuposto assenta no facto de se considerar, à escala temporal que a libertação de CO<sub>2</sub> e energia durante o processo de combustão ocorre durante um período de tempo relativamente curto. Além disso, o ciclo natural de decomposição de uma árvore pode ocorrer durante um período mais ou menos longo, podendo demorar alguns anos. Contudo, do ponto de vista de período de análise de alterações climáticas, este período de análise não exerce qualquer efeito. De facto, se existir uma gestão sustentada dos recursos, ou seja, se o nível de consumo não exceder o nível natural de produção, a utilização de biomassa não deverá gerar mais energia e emissão de CO<sub>2</sub>, do que os processos naturais (Tarelho, 2014).

### **1.1. Enquadramento e objetivos**

A necessidade de tornar sustentáveis as várias economias dos países tem levado a um crescimento na procura de recursos energéticos a nível mundial. Entre estes recursos encontra-se a biomassa, e a sua conversão energética envolvendo os processos de combustão.

A produção de energia térmica e elétrica a partir da combustão de biomassa florestal tem sofrido um incremento também em Portugal, onde existe atualmente um conjunto de unidades industriais dedicadas à produção de calor, calor e eletricidade (co-geração) ou somente eletricidade.

É reconhecido que a definição de orientações que garantam uma utilização eficiente dos recursos de biomassa disponíveis em Portugal para processos de conversão energética é de extrema importância para a economia nacional.

Alguns setores industriais utilizam os seus subprodutos derivados de biomassa para produção de energia térmica e elétrica. Um desses casos é o que sucede em empresas do grupo Lusiaves, indústria do setor agroalimentar, que tem apostado na utilização de biomassa para a produção de energia térmica. No entanto, em resultado da variedade de tipos de biomassa disponíveis para valorização energética e da tipologia das fornalhas disponíveis, é necessário adequar as condições de operação das instalações de combustão, de modo a conseguir um desempenho energético eficiente e ambientalmente compatível.

O estágio consistiu na monitorização das condições de operação de uma fornalha industrial que utiliza cama de aviário como combustível, estando esta fornalha instalada na empresa Campoaves – UTS, sediada na Figueira da Foz

O estágio teve como objetivos:

- Caracterização e análise da biomassa utilizada;
- Monitorização das condições de operação da fornalha/caldeira;
- Monitorização das características cinzas produzidas;
- Monitorização das características do efluente gasoso;

- Identificação de medidas de melhoria com vista à otimização das condições de operação da fornalha e consequente produção de vapor.

## **1.2. Tecnologias de conversão de biomassa**

Através da conversão da biomassa é possível fazer um aproveitamento de qualquer tipo de biomassa, tirando o máximo partido do seu conteúdo energético (Demirbas, 2005). Esta conversão só é possível por intermédio de processos termoquímicos, bioquímicos ou processos físicos. Na escolha do processo a utilizar deve-se ter em conta determinados fatores como disponibilidade de matéria-prima (biomassa), as condições climáticas, condições económicas, a forma em que se pretende obter a energia ou o seu impacto social. Devido a um conjunto bastante alargado de tecnologias, a utilização de biomassa pode ser realizada de forma direta ou convertida num produto intermediário. Estas tecnologias englobam caldeiras, refinarias, turbinas, reatores, motores, entre outros (Demirbas, 2004).

### **1.2.1. Combustão de biomassa**

Atualmente a combustão é considerada como uma das tecnologias mais usadas para a produção de calor, energia elétrica ou a combinação de ambas, sendo este último, o processo de cogeração, que apresenta a maior eficiência.

No processo de combustão podem ser utilizados diversos tipos de biomassa, desde biomassa florestal, resíduos resultantes da agricultura, lamas secas de ETAR, entre outros (White, 2010).

A biomassa é um dos recursos energéticos mais utilizados, permitindo, através da sua queima obter cerca de 14% das necessidades energéticas mundiais a nível doméstico e industrial. Além disso chega a ser uma fonte de energia relevante em países em vias de desenvolvimento, fornecendo 35% do total de energia produzida (Demirbas, 2004).

O processo de combustão envolve alguma complexidade, sendo fortemente influenciado pela tecnologia de combustão utilizada e pelas propriedades do combustível (Khan *et al*, 2009). Este processo divide-se em quatro etapas distintas, sendo elas: a secagem, a pirólise, a gaseificação e por último a combustão.

A secagem consiste no aquecimento do combustível, quando este está a ser alimentado para o sistema de combustão, permitindo reduzir o teor de humidade do combustível, influenciando diretamente as temperaturas no interior da fornalha.

A pirólise designa-se como a fase onde ocorre a degradação térmica (desvolatilização) do combustível na ausência de um agente oxidante externo (o oxigénio). Nesta fase ocorre a libertação de compostos voláteis e produção de efluente gasoso e resíduo carbonoso.

A gasificação caracteriza-se como sendo a degradação térmica (desvolatilização) da biomassa na presença de um agente oxidante (ar, oxigénio, vapor ou CO<sub>2</sub>) externo em quantidade suficiente para que se dê a oxidação completa. A combustão, que é a última fase do processo, caracteriza-se pela ocorrência da oxidação completa da biomassa, ocorrendo a oxidação completa dos produtos gasosos resultantes da



pirólise e gaseificação e da queima das partículas de resíduo carbonoso formadas durante essas fases (Khan *et al*, 2009; Loo *et al*, 2008).

### **1.3. Tecnologias de combustão de biomassa e consequente geração de vapor**

As tecnologias de combustão de combustíveis sólidos, utilizadas a nível industrial, encontram-se genericamente distribuídas em dois grandes grupos: combustão em leito fixo e combustão em leito fluidizado, sendo que o último pode ser distinguido em dois tipos: combustão em leito fluidizado circulante e a combustão em leito fluidizado borbulhante. Seguidamente são abordadas as diferentes características das tecnologias anteriormente mencionadas.

#### **1.3.1. Combustão em leito fixo**

A combustão em leito fixo é utilizada quando o combustível apresenta elevados teores de humidade, além de se adequar à natureza e às variadas dimensões da alimentação. De acordo com o modo em que o combustível e o comburente se cruzam na combustão em leito fixo é possível distinguir três tipos de sistemas: sistema de contra-corrente, co-corrente ou corrente cruzada.

Se a combustão de biomassa é realizada em fornalhas de leito fixo com sistema de grelha, esta tecnologia permite que a combustão se separe numa zona de combustão primária e numa zona de combustão secundária. Dada a possibilidade da co-combustão de diversos tipos de biomassa, como por exemplo, madeira com palha ou com cereais, é necessário precaução devido a um processo de combustão mais instável (Loo *et al*, 2008).

Na Figura 2 é evidenciado um exemplo do tipo de tecnologia de combustão usada neste trabalho, ou seja, fornalha com grelhas móveis inclinadas (Loo *et al*, 2008).

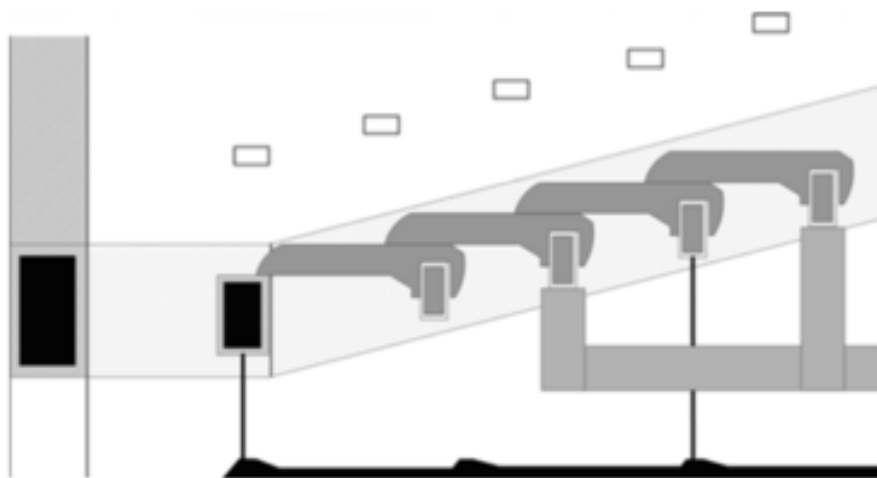


Figura 2 - Fornalha de grelhas móveis (Loo *et al*, 2008).

Ainda no que se refere às grelhas móveis da fornalha, estas podem ser refrigeradas a água ou a ar. As fornalhas com grelhas móveis refrigeradas a ar (o caso da fornalha em estudo), usam o ar primário para refrigerar a grelha. Além disso, este sistema é o mais indicado para cascas com teor de humidade elevado, lascas de madeira e serragem. Para combustíveis mais secos ou com temperaturas de fusão das cinzas mais baixas, as grelhas refrigeradas a água são a opção recomendada. Além da categoria referida anteriormente, pode-se distinguir mais quatro tipos de categorias de fornalhas de grelha: fixa, deslocamento, rotativas e vibratórias. De referir que cada um deste tipo de fornalhas possui as suas vantagens e inconvenientes, sendo necessário fazer a devida análise da melhor solução a implementar. Para que o projeto da fornalha seja bem otimizado é necessário garantir determinados requisitos como a distribuição adequada de ar e de combustível ao longo da grelha, de modo a reduzir os custos de operação e aumentar a eficiência da combustão (Loo *et al*, 2008).

### **1.3.2. Combustão em leito fluidizado**

A introdução de sistemas de combustão em leito fluidizado remonta à década de 1920, com o objetivo de incinerar resíduos. Assim a tecnologia de CLF ganhou importância, sob o ponto de vista de diversas aplicações à escala industrial (Koorneef *et al*, 2007). Como já referido, neste tipo de combustão pode-se distinguir a combustão em leito fluidizado borbulhante e a combustão em leito fluidizado circulante. A tecnologia de combustão em leito fluidizado apresenta-se como uma tecnologia viável e vantajosa e mais promissora para a combustão de diferentes tipos de biomassa, comparativamente aos sistemas de combustão tradicionais (Khan *et al*, 2009). Esta tecnologia permite um design mais compacto do reator, pois apresenta uma grande flexibilidade em termos de combustível utilizado, permitindo também obter uma maior eficiência e reduzidas emissões de SOx e NOx (Saidur *et al*, 2011).

Na CLF o ar é admitido por meio da utilização de distribuidores cónicos na base do gaseificador e a entrada constante de pequenas partículas de biomassa localiza-se na metade inferior do reator. De salientar ainda que a velocidade de injeção do ar tem que ser superior à velocidade mínima de fluidização para o correto funcionamento do reator, garantindo a fluidização, turbulência e reatividade de todas as partículas. Assim, é possível fazer a distribuição uniforme do material de reação e da temperatura (Loo *et al*, 2008).

### **1.3.3. Produção de vapor em caldeiras**

A caldeira é um recipiente fechado e pressurizado, cujo objetivo é obter vapor a partir da água, pelo intermédio do calor proveniente da queima de um combustível. Posteriormente esse vapor é aproveitado para a produção de energia térmica. Essa fonte de energia pode ser a combustão de um combustível líquido, sólido ou gasoso na fornalha, ou ainda com recurso à energia elétrica. O calor gerado é transferido para o fluido a aquecer através do corpo, por transferência de calor, por mecanismos diretos como a condução, a convecção e a radiação. Este calor também pode ser obtido recorrendo a fontes de energia como algumas energias renováveis, por exemplo.

Quanto à classificação das caldeiras para produção de vapor, destacam-se três tecnologias principais: as piro-tubulares, as aqua-tubulares e as aquo-piro-tubulares, sendo estas tecnologias seguidamente descritas.

As caldeiras piro-tubulares podem ser longitudinais, transversais e de combustão interna ou externa aos tubos. Relativamente às de tubo longitudinal, estas possuem um estrutura simples e são mais adequadas para operarem a baixa pressão. Quanto às que operam em modo transversal, podem ter tubos de diâmetros menores e possuem maior eficiência. Nas caldeiras piro-tubulares de combustão, os gases de combustão circulam dentro dos tubos (a combustão é externa a estes), transferindo parte da sua energia térmica para o fluido, que se encontra no lado da caixa.

As capacidades de produção de vapor variam 0,03 até 20 ton/h, sendo que a pressão de funcionamento adequada se situa entre os 10 e os 20 bar. Diversos fatores como as características da tubagem, a velocidade dos gases de combustão, a diferença de temperaturas entre os fluídos e a área, influenciam a transferência de calor.

As caldeiras aqua-tubulares são adequadas para gerar vapor no interior da fornalha/caldeira, sendo que quanto maior o número de tubos, maior é a capacidade de produção. Nestes equipamentos, a pressão do vapor situa-se abaixo dos 20 bar e o caudal de vapor debitado é quase sempre inferior a 22 ton/h. Um aspeto importante nesta configuração de caldeiras é o facto de o design e o volume necessários serem independentes da fornalha. São adequadas para a queima de combustíveis sólidos. As temperaturas elevadas que se fazem sentir neste tipo de caldeiras permite minimizar a formação de  $\text{NO}_x$  e melhorar a qualidade dos gases de combustão.

As caldeiras aquo-piro-tubulares são uma junção entre a tecnologia da caldeira piro-tubulares e aqua-tubulares, no sentido em que água ou gases de combustão podem circular em sistemas independentes do lado das tubagens. Estão adaptadas para produzir vapor de água de média ou alta pressão em instalações industriais de média e grande dimensão (El-Mahallawy, 2004; Hirayama, 2009).

#### **1.4. Propriedades da biomassa que influenciam o processo de combustão**

Cada tipo de biomassa apresenta determinadas propriedades, sendo estas fulcrais para determinar qual o processo de conversão mais indicado. Entre as várias propriedades da biomassa conhecidas, o teor de humidade, o poder calorífico, o teor em cinzas, o conteúdo em voláteis e composição elementar são as mais relevantes para o processo de combustão (Quaak *et al*, 1999).

##### **1.4.1. Teor de humidade**

A humidade é parâmetro relevante nos processos termoquímicos e, em particular na combustão, o PCI (poder calorífico inferior) e o PCS (poder calorífico superior) variam inversamente com a humidade (Tarelho, 2014). Tal relação é verificada na Figura 3 (Gonçalves, 2002).

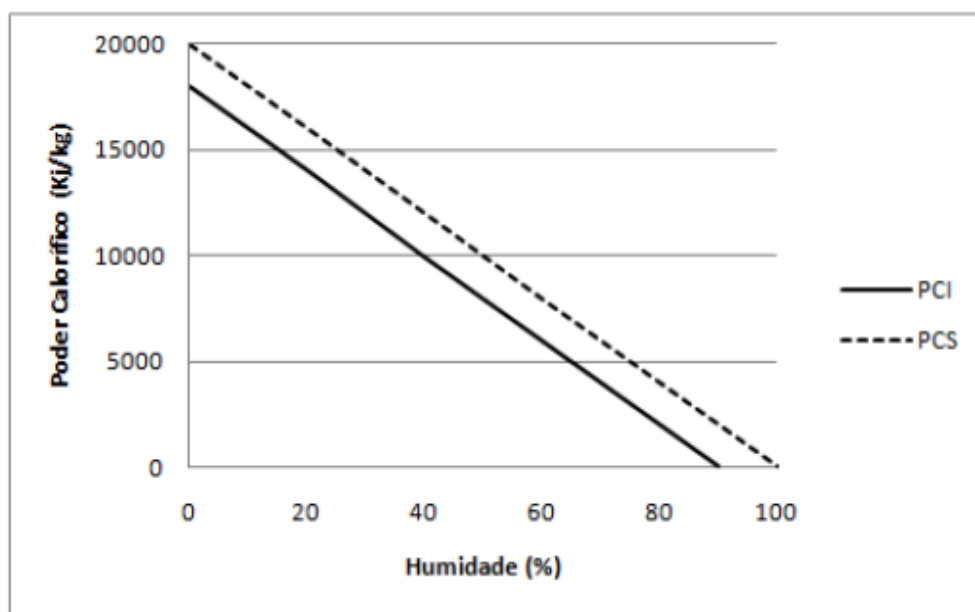


Figura 3 - Variação do PCI e do PCS com o teor de humidade (Gonçalves, 2002).

Esta propriedade altera o comportamento da biomassa durante a combustão, ocorrendo uma diminuição das temperaturas com aumento do teor de humidade (Vassilev *et al*, 2010).

Um combustível com um elevado conteúdo de água necessita de tempos de residência superiores, para que seja possível uma secagem adequada do material a queimar. Ao reduzir a humidade de 50 para 30% por tonelada de biomassa em base seca, obtêm-se um ganho em termos de rendimento térmico na ordem dos 8,7% (Oberberger, 1998). Além disso não é aconselhada a secagem empilhada ao ar, pois o ganho de rendimento térmico não compensa a degradação biológica da biomassa. Teores de humidade acima dos 60% em base húmida podem comprometer o processo de combustão (Tarelho, 2014; Oberberger, 1998).

#### 1.4.2. Poder calorífico

O poder calorífico diz respeito à energia calorífica que é possível extrair por quilograma de biomassa, quando queimada ao ar. Pode-se apresentar este parâmetro de duas maneiras, o poder calorífico inferior e o poder calorífico superior. O PCI representa a energia disponível por kg de biomassa e obtêm-se fazendo a diferença entre o PCS e o calor latente do vapor de água contido nos gases de escape. O PCS representa a energia calorífica máxima possível de extrair por kg de combustível (Tarelho, 2014). Na Tabela 1 estão presentes os valores de PCI de diferentes biomassas a nível nacional (Costa, 2005).

Tabela 1 - Valores de PCI de diferentes tipos de biomassa a nível nacional (Costa, 2005).

Quantidade	Casca de arroz	Caroço de pêssego	Serrim	Casca de pinheiro	Pontas e ramos do pinheiro	Caroço de azeitona
PCI (MJ/kg)	13,88	16,18	15,99	16,42	17,00	16,36

Como se pode verificar na tabela anterior, as pontas e ramos do pinheiro possuem o PCI mais elevado, enquanto que a casca de arroz caracteriza-se por ter o PCI mais reduzido.

#### 1.4.3. Teor em cinzas

Os resíduos sólidos são constituídos por materiais inertes resultantes do processo de combustão, uma vez que estes não são destruídos durante o processo. Designa-se estes resíduos por cinzas. As cinzas constituem um fluxo de material que é expulso pelo sistema de combustão e para o qual é necessário encontrar um destino final adequado, sendo que tal implica um custo de operação contínuo para o transporte e deposição do material.

A produção de cinza afeta tanto o sistema de remoção desta, como o projeto de todo o sistema de conversão de biomassa, ou seja, a queima, a fornalha, a caldeira, o tratamento de gases além de influenciar a operação da instalação (Khan, 2009).

#### 1.4.4. Conteúdo em voláteis

O teor de voláteis, também apelidado de matéria volátil de biomassa, corresponde ao gás libertado, incluindo humidade, quando exposto a uma temperatura de 950°C durante sete minutos.

A matéria volátil de biomassa traduz a facilidade com que o combustível é inflamado, mesmo a baixas temperaturas. Como consequência pode ser gasificado ou oxidado, de acordo com o fim pretendido. No caso da biomassa este teor é elevado, cerca de 75% e vai originar uma taxa de reação rápida (Khan *et al*, 2009).

#### 1.4.5. Composição elementar

A composição elementar diz respeito aos elementos integrantes da biomassa e a sua proporção. Através da composição elementar é possível determinar o poder calorífico e as necessidades de comburente, ao longo dos processos termoquímicos.

Na Tabela 2 podem ser observadas as características de alguns tipos de combustíveis de biomassa (Silva, 2009).

Os teores de C, H e O são semelhantes nos vários tipos de biomassa, já o conteúdo de N, é bastante variável. Muitos tipos de biomassa possuem na sua constituição

elementos como o Ca, Cl, K, P, S, Si e alguns metais pesados que são causadores de alguns problemas tecnológicos e ambientais durante o processamento da biomassa (Vassilev *et al*, 2010).

Tabela 2 - Características de alguns tipos de biomassa (Silva, 2009).

Parâmetros	Unidades	Casca de arroz	Resíduos de madeira	Pó de serra	Resíduos florestais	Eucalipto
Humidade	% m	9,70	14,20	53,90	29,60	7,30
Voláteis	-	66,00	79,10	39,19	-	-
C	% m, bssc	40,20	49,00	50,60	48,20	48,83
H	-	5,00	5,90	6,00	6,00	6,00
O	-	36,30	40,70	42,78	44,57	44,06
N	-	0,30	2,50	0,20	-	-
S	-	0,05	0,05	0,01	0,02	0,02
Cl	-	0,10	0,03	0,01	0,01	0,10
Cinzas	-	18,20	1,90	1,20	1,20	0,95

### 1.5. Emissão de gases na combustão de biomassa

Da combustão de biomassa, resulta a emissão de gases para a atmosfera. Estas emissões podem ter um efeito reduzido ou um efeito mais alargado, dependendo do tipo e quantidade de poluentes emitidos. O tipo de tecnologia de combustão, bem como os diferentes tipos de biomassa a queimar influenciam diretamente as características dos gases emitidos para a atmosfera.

Como principais constituintes do efluente gasoso pode-se ter o CO<sub>2</sub>, o CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub>. Um outro aspeto que influencia a quantidade de poluentes nos gases é se ocorreu uma combustão completa ou incompleta. A combustão incompleta ocorre devido a:

- mistura inadequada do combustível com o ar de combustão na câmara de combustão;
- baixas temperaturas na câmara de combustão;
- tempos de residência curtos;
- disponibilidade de oxigénio.

De acordo com a Tabela 3, os diferentes constituintes do efluente gasoso podem provocar diversos impactos a nível climático, ambiental e na saúde (Loo *et al*, 2008).

De modo a minimizar a formação destes poluentes, existem técnicas de redução primárias e secundárias. As primárias dizem respeito à modificação da composição do combustível, o uso de substâncias aditivas e a otimização dos processos de combustão. Quanto às medidas secundárias, destacam-se tecnologias usadas para a redução de determinados poluentes presentes nos gases de combustão, como ciclones e mult ciclones por exemplo (Loo *et al*, 2008).

Tabela 3 - Impactos provocados pelos diferentes constituintes do efluente gasoso (Loo *et al*, 2008).

Componentes	Fontes de biomassa	Impactos no clima	Impactos no ambiente	Impactos na saúde
CO <sub>2</sub>	O principal componente resultante da combustão de vários tipos de biomassa.	Um dos componentes responsáveis pelo efeito de estufa.	-	-
CO	Combustão incompleta de vários tipos de biomassa.	Gás de efeito de estufa indireto através da formação de ozono.	-	Leva à prevalência de asma e afeta negativamente a gestação
CH <sub>4</sub>	Combustão incompleta de vários tipos de biomassa.	Um dos componentes responsáveis pelo efeito de estufa.	-	-
NO <sub>x</sub>	Componente minoritário resultante da combustão de biomassa que possui azoto na sua constituição.	Gás de efeito de estufa indireto através da formação de ozono.	Chuva ácida. Destruição da vegetação. Formação de smog. Provoca corrosão e destruição dos materiais.	-
SO <sub>x</sub>	Componente minoritário resultante da combustão de biomassa que contém enxofre na sua constituição	-	Chuva ácida. Destruição da vegetação. Formação de smog. Provoca corrosão e destruição dos materiais.	Efeitos negativos sobre o sistema respiratório humano.

### 1.5.1. Enquadramento legal relativo às emissões em Portugal

Com a melhoria da eficiência das tecnologias de combustão assegura-se muitas das vezes uma redução das emissões de gases poluentes.

Devido a um conjunto de leis e regulamentos presentes em Portugal, existem limites relativos à concentração dos gases emitidos e produzidos. É fundamental, para a saúde da população em geral e a nível ambiental, que esses limites sejam cumpridos, independentemente da instalação de combustão em causa.

A Portaria nº675, 676 e 677/2009 de 23 de Junho, bem como o Decreto-Lei nº78/2004 de 3 de abril permitem assegurar a prevenção e o controlo de emissões de

poluentes para a atmosfera. Estes instrumentos legais, além de permitirem a redução das emissões de gases resultantes das instalações de combustão, são aplicáveis a instalações com potência térmica nominal superior a 100 kW<sub>th</sub>. Há uma definição dos Valores Limite de Emissão, além de todos os procedimentos de análise e controlo para os poluentes.

Nas Tabelas 4 e 5, estão presentes os VLE vigentes para os poluentes gerais e mais comuns, respetivamente.

Tabela 4 - Valores Limite de Emissão para os poluentes mais comuns (Portaria nº675/2009, de 23 de junho)

Poluente	Valor limite (mg/Nm³)
Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	500
Oxido de azoto (NO <sub>x</sub> )	500 (expressos em NO <sub>2</sub> )
Partículas (PTS)	150
Compostos inorgânicos fluorados	5 (expresso em F)
Compostos inorgânicos clorados	30 (expresso em Cl)
Sulfureto de hidrogénio (H <sub>2</sub> S)	5
Composto orgânicos voláteis (COV)	200 (expresso em C)
Composto orgânicos voláteis não metânicos (COVNM)	110 (expresso em C)
Cloro (Cl <sub>2</sub> )	5
Br e compostos inorgânicos de Br	5 (expresso em HBr)
Metais I <sup>(1)</sup>	0,2
Metais II <sup>(2)</sup>	1
Metais III <sup>(3)</sup>	5

Tabela 5 - Valores Limite de Emissão para os poluentes mais comuns (Portaria nº677/2009, de 23 de junho)

Combustível	Teor de O <sub>2</sub> de referência (percentagem)	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	PTS	H <sub>2</sub> S
Sólido: Geral Biomassa	6	2 000 <sup>(1)</sup>	650	500	VLE geral <sup>(2)</sup>	VLE geral <sup>(2)</sup>
	11	VLE geral <sup>(2)</sup>				
Líquido: Geral	<sup>(4)</sup> 3	1 700	VLE geral <sup>(2)</sup>	500	VLE geral <sup>(2)</sup>	VLE geral <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>
Gasoso: Fuel gás da refinação do petróleo	3	35	300	500	50	VLE geral <sup>(2)</sup>
	8	50				30

<sup>(1)</sup> No caso de caldeiras com leito fluidizado o VLE é 600 mg/Nm³.

<sup>(2)</sup> Definido na Portaria n.º 675/2009, de 23 de Junho (VLE gerais).

<sup>(3)</sup> No caso do sector da refinação do petróleo, o VLE é 30 mg/Nm³.

<sup>(4)</sup> Teor de oxigénio de 8% para caldeiras de instalações em exploração ou funcionamento à data da entrada em vigor da presente portaria.





## 2. Entidade de acolhimento: Campoaves-UTS

O estágio decorreu na unidade industrial Campoaves – UTS, sediada na zona industrial de Gala, concelho da Figueira da Foz, esta fábrica dedica-se à transformação de subprodutos, sendo eles: pena, sangue e carne de diversos tipos de aves, para a obtenção de farinha.

A unidade industrial labora vinte e quatro horas por dia, de segunda a sábado, contando com a presença de quinze colaboradores que operam por turnos.

A matéria-prima é proveniente de diversos matadouros da região e não só, sendo encaminhada até à empresa para ser transformada rapidamente, devido à facilidade de decomposição da mesma, de modo a não prejudicar o produto final. Tal procedimento permite minimizar a formação de bactérias e reduzir o odor característico do material, traduzindo-se num menor risco para os colaboradores, contribuindo também para uma maior higiene e segurança no local de trabalho.

Dentro da fábrica existem três linhas de produção, conforme verificado na Figura 4: uma linha para a transformação de pena, outra para a carne e uma última para o sangue, sendo as últimas duas as menos complexas. Já a linha da carne é a que exige atenção redobrada, devido às características do material a transformar. O produto final resultante é a farinha (de carne, pena e de sangue) que posteriormente é armazenada em silos, para ser vendida para outras empresas (empresas de fabrico de rações para animais).

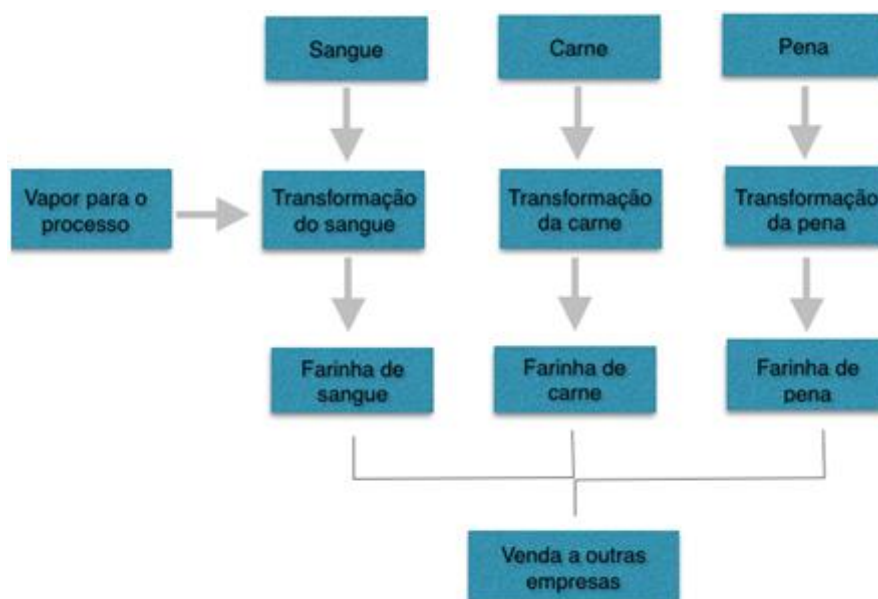


Figura 4 - Descrição generalizada do processo produtivo.

Para satisfazer as necessidades de térmicas do processo produtivo existem diversas caldeiras para a produção de vapor de água, sendo que estas operam com diferentes combustíveis.

A gordura resultante do processo é vendida a empresas exteriores, para depois ser utilizada para a produção de cosméticos, sabonetes e outros produtos.

Quando as linhas de transformação estão paradas, o vapor que ainda está a ser

produzido pela caldeira continua a ser aproveitado para limpeza dos secadores e outros componentes responsáveis pela transformação da matéria-prima. Além disso, pode também ser usado para aquecimento dos tanques de gordura e uma parte utilizada no oxidor (o equipamento que permite fazer a oxidação dos odores resultantes do processo de transformação de subprodutos).

### 2.1. Descrição da instalação de combustão e respetivos sistemas auxiliares

Seguidamente faz-se uma descrição detalhada de cada um dos sistemas auxiliares inerentes ao sistema de combustão, que ao operarem de forma conjunta, permitem que a combustão ocorra. Esta instalação de combustão encontra-se instalada na empresa Campoaves - UTS, sendo lá que decorreu toda a análise à instalação e respetivas condições de operação. A Figura 5 evidencia um esquema da instalação de combustão.



Figura 5 – Instalação de combustão e principais componentes que a integram

Relativamente à numeração presente na Figura 5, o número 1 diz respeito ao corpo da fornalha/caldeira, o 2 é o economizador, o 3 é o ciclone, o 4 é o ventilador de extração, o 5 é chaminé, o 6 é correspondente ao silo de facas, o 7 é o parafuso sem fim de extração de biomassa do silo, o 8 é alimentação de biomassa, o 9 diz respeito ao redler, o 10 é o queimador a gás, o 11 é o separador de água-vapor, o 12 são os ventiladores de insuflação de ar de combustão, o 13 diz respeito às grelhas e o 14 são as bombas para alimentação de água à caldeira. Para esta instalação de combustão em concreto tem-se como sistemas indispensáveis: o de alimentação de combustível, o de alimentação de ar de combustão, a caldeira, o de alimentação de água, o de tratamento e exaustão de efluentes gasosos, o sistema de descarga de cinzas e o de supervisão e controlo da instalação, sendo cada um destes sistemas descritos

seguidamente.

### **2.1.1. Sistema de alimentação de combustível**

A biomassa é armazenada num silo de facas metálico, com capacidade de armazenagem de cerca de 100 m<sup>3</sup>. Quando é necessário combustível para a caldeira, o sistema de acionamento hidráulico ativa e vai arrastando de forma alternada a cama de aviário até ao parafuso sem fim de extração que se encontra em movimento. O combustível é encaminhado até um parafuso sem fim transportador que leva o combustível até uma tolva. Depois dessa tolva, o combustível é encaminhado através de um parafuso sem fim para duas tolvas. Na base de cada uma dessas tolvas existe um parafuso sem fim que empurra a cama de aviário para o interior da caldeira para ser queimada. Há ainda um sistema de anti-retorno de chama. Na Figura 6 está presente a tolva de receção do combustível.



Figura 6 - Tolva de receção do combustível.

### **2.1.2. Sistema de alimentação de ar de combustão**

O sistema ar de combustão alberga uma série de componentes que vão desde a conduta de transporte do ar de combustão até à fornalha e condutas de transporte do ar de combustão para o interior da caldeira, o ventilador de insuflação de ar primário e o ventilador de insuflação de ar secundário. O caudal de ar de combustão é então insuflado para o interior da caldeira. Uma parte desse caudal (o caudal secundário) segue para o ventilador de insuflação de ar de combustão secundário, sendo também injetado no interior da caldeira, numa parte superior da fornalha. Existe ainda um sistema de medição do caudal que permite a determinação do caudal que está a ser insuflado em tempo real, sendo este sistema descrito numa fase posterior do trabalho. A Figura 7 mostra o ventilador de insuflação primário e secundário.

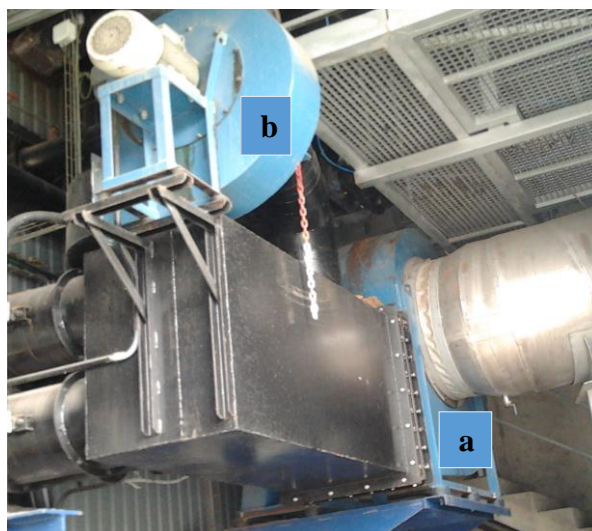


Figura 7 - Ventiladores de insuflação de ar de combustão primário (a) e secundário (b).

### **2.1.3.Fornalha/caldeira**

A instalação de combustão em estudo possui uma caldeira do tipo aquotubular e uma fornalha de leito fixo, com grelhas móveis de 19 m<sup>2</sup> de área, inclinadas e refrigeradas a ar.

A fornalha é de execução monobloco, construída exteriormente em betão e interiormente por material refratário de alto teor de alumina, tanto na base, como nas paredes laterais e tijolo isolante junto às paredes de betão. Este material refratário está adaptado para resistir às altas temperaturas atingidas no interior da fornalha. A caldeira é isolada com manta de lá de rocha, recoberta com chapa canelada pintada e aço inoxidável. A fornalha industrial divide-se em quatro zonas (secagem, pirólise, combustão do carbono e pós combustão), sendo o ar alimentado à caldeira distribuído ao longo da mesma. A fornalha está ainda adaptada para operar com estilha. Pode também funcionar com gás natural, através da presença de um queimador de gás localizado no exterior da fornalha/caldeira.

A biomassa é empurrada ao longo das grelhas com velocidade variável, havendo assim uma combustão uniforme da biomassa ao longo das mesmas. Existem ainda zonas para entrada de ar para a combustão ao longo das grelhas.

A fornalha/caldeira é ainda dotada de diversos sensores de temperatura e alguns manómetros em determinadas zonas, de forma a extrair em tempo real valores de temperatura e de pressão, respetivamente. No exterior da caldeira são ainda visíveis portas de acesso às grelhas, bem como portas para permitir a limpeza da caldeira. A caldeira apresenta ainda no exterior chapeletas de explosão, válvulas de purga, indicadores de nível, pressostatos, entre outros componentes.

### **2.1.4.Sistema de alimentação de água**

Um tanque de condensação retém a água que resulta da condensação do vapor utilizado nas linhas de transformação. Do tanque de condensação, a água é

bombeada para o desgaseificador, de modo a extrair os gases presentes na água. Este processo evita a corrosão das tubagens e outros componentes. Depois de sair do desgaseificador, a água segue para o interior da caldeira, para se obter vapor de água.

#### **2.1.5. Sistema de exaustão e tratamento de efluentes gasosos**

Relativamente a este sistema, os gases saem da caldeira a temperatura elevada e uma parte desses gases é encaminhada para o economizador de modo a fazer-se o reaproveitamento da temperatura desses gases para aquecimento de água. Os gases passam também pelo ciclone onde são extraídas as partículas em suspensão no efluente gasoso. Seguidamente existe uma longa tubagem na horizontal que vai fazer o transporte dos gases. Posteriormente existe um ventilador de extração que vai extrair os gases para serem expulsos pela chaminé. Este ventilador de extração permite manter todo o sistema de combustão em depressão. Na Figura 8 apresenta-se o economizador.



Figura 8 – Aspeto do economizador.

#### **2.1.6. Sistema de descarga/recolha de cinzas**

Um dos produtos finais resultante da combustão são as cinzas. As cinzas de fundo caem no redler, que é uma espécie de uma calha, cheia de água localizada na base da fornalha/caldeira onde as cinzas a elevada temperatura se depositam, havendo uma redução imediata da temperatura das mesmas. Essas cinzas húmidas são depois transportadas por uma corrente transportadora para o exterior da caldeira e encaminhadas para um parafuso sem fim que as guia até ao contentor de armazenamento das cinzas. As restantes cinzas resultantes do processo, as cinzas volantes, vão também ter até esse parafuso sem fim onde são misturadas com as



cinzas de fundo. Esse parafuso sem fim transporta a mistura de cinzas até ao contentor destinado para a retenção das mesmas.

### 2.1.7. Sistema de monitorização e controlo de operação da instalação

Quanto à supervisão tem-se supervisão local do sistema da Hikvision, que inclui um computador e monitor instalados na sala de comandos da caldeira e outro na sala de comandos da fábrica. O sistema de controlo da Vidjeowebgate permite que os operadores tenham acesso ao estado da fornalha e sistemas auxiliares. Existe um outro monitor na sala de comandos onde, além de permitir a ativação/desativação da fornalha, é possível acompanhar o estado dos principais equipamentos e fazer pequenas alterações, seja desde do aumento de velocidade dos sem fins, alteração da velocidade das grelhas, até à alteração da quantidade de ar de combustão que é insuflado nas diferentes zonas da fornalha. Faz parte ainda um sistema de videovigilância, onde é possível visualizar em tempo real o ebulidor da caldeira, o sistema de alimentação, o silo de armazenamento e a combustão da biomassa no interior da caldeira, como evidenciado na Figura 9.



Figura 9 - Supervisão das diferentes zonas da instalação de combustão.

### 2.1.8. O coletor

O coletor é o sistema responsável pela receção e distribuição do vapor para a fábrica. É constituído por um conjunto de tubagens, nomeadamente a tubagem relativa ao desgaseificador, ao escape, à caldeira, à fábrica e aos sopradores. No coletor encontra-se instalado um termómetro e um manómetro de modo a saber a temperatura e pressão a que o vapor se encontra, respetivamente. Na Figura 10 encontra-se representado o coletor da caldeira.



Figura 10 - Coletor de vapor da caldeira antes da distribuição para a caldeira

## 2.2. Características técnicas

Na Tabela 6 estão presentes algumas características de alguns dos principais componentes que integram a instalação de combustão.

Tabela 6 - Características técnicas dos diversos componentes da instalação de combustão

Equipamentos/parâmetros	Ventilador de extração	Grelha móvel inferior	Grelha móvel superior	Ventilador de insuflação de ar de combustão primário	Ventilador de insuflação de ar de combustão secundário	Parafuso sem fim de alimentação de biomassa esquerdo	Parafuso sem fim de alimentação de biomassa direito	Fornalha/caldeira
Potência (kW)	132,0	0,550	0,550	18,5	7,50	2,20	2,20	15000
Set point automático (Pa)	-300,0	-	-	-	-	-	-	-
Freq. <u>pontas</u> em automático (Hz)	-	-	-	58,5	50,0	59,0	59,0	-
Freq. <u>máxima</u> em automático (Hz)	50,0	-	-	52,0	40,0	53,0	53,0	-
Freq. <u>mínima</u> em automático (Hz)	16,0	-	-	27,5	30,0	25,0	25,0	-
Freq. <u>funcionamento</u> em manual (Hz)	16,0	-	-	50,0	45,0	30,0	30,0	-
Freq. <u>avanço</u> (Hz)	-	20,0	22,0	-	-	-	-	-
Freq. <u>recuo</u> (Hz)	-	20,0	22,0	-	-	-	-	-
Tempo de paragem avançada/recuada (s)	-	15,0	5,0	-	-	-	-	-

## 2.3. Integração da instalação de combustão no processo produtivo da fábrica

Motivada por um recurso que não estava a ser aproveitado da melhor maneira, a empresa Campoaves - UTS decidiu valorizar energeticamente a cama de aviário, combustível este que se produz em grandes quantidades. Houve a necessidade de



conceber uma fornalha que efetuasse a queima deste combustível. Essa fornalha permitiria a produção de vapor para ser utilizado nas diferentes linhas de transformação de subprodutos.

Na unidade industrial existem cerca de duas caldeiras a gás natural, uma fornalha/caldeira a estilha e por último, a mais recente aposta, uma fornalha/caldeira a cama de aviário. O vapor produzido através das caldeiras é utilizado nos secadores (para o aquecimento do ar de secagem) das linhas de transformação, permitindo que o material a transformar perca a água e gordura necessária. À entrada destes equipamentos existe uma válvula, que regula a entrada de vapor. Esta regulação permite que o vapor chegue ao processo de forma controlada, de modo a não influenciar negativamente a qualidade do produto final.

### **3. Caracterização das condições de operação da fornalha industrial**

No presente capítulo faz-se a descrição de algum equipamento utilizado para medição de algumas grandezas que serviram de base para a caracterização de algumas condições de operação do sistema de combustão.

#### **3.1. Caracterização do combustível**

Os deferentes tipos de biomassa utilizados para valorização energética devem ser devidamente caracterizados. A fornalha industrial tem como combustível a cama de aviário. Este tipo de biomassa é constituído essencialmente por casca de arroz, como observado na Figura 11, sendo oriunda de vários centros de produção de aves. Além da casca de arroz pode-se ter ainda aparas de madeira. Além disso é possível verificar que o resíduo de aviário possui penas, dejetos e resíduos de alimentação.



Figura 11 - Amostra de cama de aviário utilizada na caracterização.

Esta biomassa apresenta um odor intenso e uma humidade que pode variar desde os 22% até aos 55% em massa (valores obtidos a partir do analisador de humidade), sendo esta humidade variável de dia para dia e de acordo com as condições de armazenamento. Após algum tempo de armazenamento, o combustível adquire uma tonalidade mais escura, indicando que se encontra mais seco (isto dependendo das condições de armazenamento). Um outro combustível utilizado pela fornalha (ainda que em menor quantidade) é a estilha de madeira. Na Tabela 7 é possível verificar a composição de diferentes amostras de camas de aviário e de uma amostra de estilha de madeira (Sanches, 2007; Tarelho, 2014).

Tabela 7 - Composição de diferentes tipos de cama de aviário (Sanches, 2007; Tarelho, 2014).

Material	Humidade (%btq)	Humidade %bs	Composição elementar (%bs)					Cinzas (%bs)	PCI (MJ/kg <sub>bs</sub> )
			C	H	O	N	S		
Cama de aviário 1	-		34,70	5,20	54,09	5,60	0,13	-	17,41
Cama de aviário 2	5,70		36,1	3,53	40,89	2,62	0,16	16,70	-
Cama de aviário 3	-	29,00	34,84	5,21	38,99	2,87	0,13	20,00	*
Estilha de madeira	10,00		50,63	6,45	40,85	1,36	Nd	0,71	*

\*Valores determinados numa fase posterior de trabalho

A composição considerada para estudo neste trabalho, foi a designada por cama de aviário 3, na Tabela 7. Na Figura 12 é possível verificar a diferença entre um combustível com menor teor de humidade (cor mais clara) e um combustível com um teor de humidade mais elevado (cor mais escura).



Figura 12 - Diferença entre o combustível mais húmido e mais seco.

### 3.1.1. Poder calorífico inferior do combustível

A cama de aviário, apesar de ser um combustível que queima de forma razoável não possui um PCI muito elevado, comparativamente com o valor de outros combustíveis. É de salientar que quanto maior for o valor do PCI, melhor é a combustão do combustível.

Como se constatou na Tabela 1 do capítulo 3, a casca de arroz possui um PCI baixo, comparativamente com outros combustíveis.

Para saber o valor aproximado do PCI da cama de aviário e também da estilha de madeira, utilizou-se a composição em base seca presente na Tabela 7 (cama de aviário 3) para em primeiro lugar determinar-se o PCS (Eq.1), sendo de seguida possível a determinação do valor de PCI (Eq.2) (Tarelho, 2014):

$$\text{PCS}_{\text{ca/em}} = 34,91 \times W_{\text{CR}} + 117,83 \times W_{\text{HR}} + 10,05 \times W_{\text{SR}} - 10,34 \times W_{\text{OR}} - 1,51 \times W_{\text{NR}} - 2,11 \times W_{\text{ZR}} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\text{PCI}_{\text{ca/em}} = \text{PCS} - W_{\text{HR}} \times \frac{18}{2} \times h_{\text{f}_{\text{H}_2\text{O},\text{T}}} \quad (\text{Eq.2})$$

### 3.1.2. Granulometria do combustível

A cama de aviário possui uma granulometria muito reduzida (como mostra a Figura 11), no entanto é possível observar diversos bocados de esterco de animal (como referido anteriormente) juntamente com a casca de arroz, fazendo com que a granulometria do combustível não seja muito uniforme. Uma vez que se trata de um combustível de pequena dimensão, não é necessário efetuar qualquer tratamento do mesmo, sendo transportado, por camião, diretamente do centro de produção (aviário) até ao armazém, para depois ser queimado. O facto de ser extraído diretamente do centro de produção até ao centro de consumo, sem necessitar de pré-tratamento, traduz-se numa redução de custos para a empresa.

### 3.1.3. Determinação do teor de humidade do combustível

O conteúdo em humidade tem influência direta no processo de combustão, na temperatura adiabática de chama e no volume de gases produzidos por unidade de energia convertida (Tarelho, 2014). A necessidade de controlar a humidade do combustível além de ser importante pelos aspetos referidos anteriormente é igualmente fulcral para maximizar a durabilidade dos diversos componentes por onde o combustível segue até atingir o interior da caldeira, nomeadamente os diversos parafusos sem fim existentes. Uma vez que o combustível é armazenado num pavilhão da empresa em antes de ser utilizado, acaba por perder algum teor de humidade, sendo uma vantagem, principalmente quando este chega à fábrica com um teor de humidade elevado. Além disso há a perda de humidade no sistema de transporte da biomassa em antes de esta entrar na caldeira, sendo este assunto analisado numa fase posterior do trabalho. Dadas algumas limitações em termos de disponibilidade de equipamentos, a determinação do teor de humidade teve lugar na empresa. Foram recolhidas várias amostras, em diferentes alturas. O aparelho utilizado, representado na Figura 13 foi um

analisador de humidade, de elevada precisão, que normalmente é utilizado para a medição do teor de humidade da farinha, no entanto, dada a dimensão do combustível foi também possível determinar o conteúdo de humidade das amostras de cama de aviário.



Figura 13 – Analisador de humidade.

O aparelho funciona como base num sistema de aquecimento, através uma resistência. A amostra é colocada no prato, seguidamente fecha-se a tampa do aparelho e efetua-se a pesagem do prato e só depois é que se coloca a quantidade de amostra pretendida. Na Tabela 8 são apresentadas as características do aparelho.

Tabela 8 - Características técnicas do aparelho de medida.

Parâmetros	Valores/ Unidades
Precisão da leitura nos valores de humidade (%)	0,01
Humidade e resíduo seco	%
Peso	g
Peso máximo de amostra	35 g
Amplitude de temperaturas	50-160°C

Após a pesagem da amostra, inicia-se a determinação propriamente dita da humidade devido a uma resistência incorporada no equipamento, que permite a secagem do material. A temperatura programada para a secagem ronda os 104-105°C. Para saber o valor de humidade existe uma espécie de sensor de humidade que nos

permite saber, terminado o tempo de secagem da amostra qual a humidade em percentagem. É possível saber ainda qual a quantidade final de amostra após a secagem.

Na Tabela 9 é possível verificar os diferentes teores de humidade obtidos depois da análise de algumas amostras.

Tabela 9 - Valores de humidade de algumas amostras de biomassa.

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8
% humidade em massa	51,0	54,0	47,0	35,1	43,0	41,4	33,0	34,5

Fazendo uma breve análise à Tabela 9 verifica-se as amostras que possuem somente casca de arroz, o teor de humidade situou-se entre os 33 e os 54% em massa (amostras 1, 2, 3, 7 e 8). Quanto à biomassa contendo casca de arroz e aparas de madeira, o conteúdo de humidade situou-se entre os 35 e os 43% em massa (amostras 4, 5 e 6). Apesar de ser possível a determinação do teor de humidade de forma imediata na fábrica, é de salientar alguns aspetos a ter em conta, que podem provocar variações nos resultados obtidos. Em primeiro lugar, de referir que era necessário um equipamento que permitisse a utilização de uma maior quantidade de amostra. Além disso o equipamento utilizado estava situado na sala de controlo, onde há constantemente interferências, seja pela entrada e saída dos operadores, seja por pequenas correntes de ar ou pela temperatura relativamente elevada que se faz sentir nesse espaço. Um último aspeto, mas não menos importante tem a ver com o transporte da amostra de biomassa do local de extração até ao local de análise. A amostra era recolhida para sacos de plástico, sendo que se procedia ao fecho dos mesmos, logo após a recolha, no entanto nesta etapa, havia sempre uma perda de conteúdo de humidade, visível através da formação de pequenas gotas de condensação no saco.

#### 3.1.4. Determinação do caudal de combustível

Uma grande quantidade de combustível chega à empresa todos os dias. Cada camião transporta em média cerca de vinte toneladas de biomassa. No total chegam cerca de cento e vinte toneladas de material ao armazém por dia. Em média há a extração de cerca de cinco toneladas por hora de material do silo, para alimentar a caldeira. No entanto, e de modo a ter um valor mais concreto da quantidade de material que é alimentado à caldeira por hora, optou-se por fazer o seguinte procedimento. Colocou-se um pequeno depósito na zona onde a biomassa é extraída e procedeu-se ao enchimento do depósito com combustível. Colocou-se o reservatório (cheio) numa

balança presente na fábrica, onde foi possível efetuar a pesagem do material.

Este equipamento de pesagem permite a medição de massas entre os 0 e os 1200kg, sendo a informação apresentada no display mostrador (Figura 14) que arredonda o valor de massa medido às décimas de kg, tendo-se uma precisão de +/- 0,1kg.



Figura 14 - Mostrador digital da balança.

Em primeiro lugar efetuou-se a pesagem do depósito vazio e numa fase posterior, o depósito com o material no interior. De salientar que este procedimento se efetuou quando a fornalha se encontrava em pleno funcionamento. De salientar que a biomassa possuía cerca de 36% de humidade em massa.

Tendo em conta o valor determinado pela empresa responsável pelo desenvolvimento da caldeira (cerca de 5 toneladas com um teor de humidade na biomassa de 29% em massa), verifica-se que adotar uma quantidade de biomassa alimentada à caldeira que se situa entre as 4,5 e as 5 toneladas por hora é o mais correto nestas circunstâncias. No entanto, a quantidade de combustível que é alimentada à caldeira pode variar muito se o combustível tiver muita ou pouca humidade e se o regime de funcionamento da fornalha for mais ou menos estável.

### **3.2. Caracterização do ar de combustão**

Na fornalha verifica-se a admissão de ar primário e de ar secundário além de haver ainda entrada de ar ao longo das portas das grelhas, dando um contributo significativo para que a combustão seja o mais completa possível. O ar de combustão, proveniente do interior da fábrica segue por uma conduta com um metro de diâmetro, devido ao ventilador de insuflação de ar de combustão. Ao longo da fornalha é feita a insuflação do caudal de ar de combustão, sendo insuflado 35% de ar na primeira zona, 30% para a segunda zona, 25% para a terceira e 10% para a zona de cinzas. Estas percentagens podem ser ajustadas, tendo em conta as características da biomassa que chega à

caldeira. A temperatura do ar de combustão situa-se em média entre os 40 e os 43°C, no que toca ao ar de combustão primário e entre os 44 e os 46°C no que toca ao ar de combustão secundário. O facto de injetar ar a uma temperatura mais elevada permite que não seja necessário tanta energia para o aquecer, quando este é injetado na fornalha/caldeira.

### **3.2.1. Determinação do caudal de ar de combustão**

A determinação do ar necessário para a combustão é feita através de um sistema de medição instalado na fornalha industrial. Este sistema de medição permite determinar o caudal de ar primário, secundário e de exaustão. A medição de caudais é feita por três tubos de Pitot na exaustão de gases e na insuflação de ar. A medição é realizada por “asas de avião”, que não é mais do que um perfil de alumínio em forma de “asa de avião” com vários orifícios relativos aos vários tubos de Pitot. Para cada zona de leitura existem duas “asas de avião”, uma na horizontal e uma outra na vertical, de modo a “varrer” todo o perfil de escoamento e deste obter-se uma leitura mais precisa. Estes tubos de Pitot, por sua vez, estão ligados a sensores de pressão diferenciais, que permitem a determinação da velocidade. Sabendo a área da conduta e a temperatura do gás, determina-se o caudal de ar. Este valor de caudal normalizado é apresentado em m<sup>3</sup>/h.

## **3.3. Caracterização da combustão**

### **3.3.1. Medição de temperatura nos diferentes pontos da fornalha**

No corpo da fornalha estão presentes cerca de 11 sondas de temperatura, que permitem saber, em tempo real, qual a temperatura nos vários pontos do interior da caldeira. Trata-se de sondas termopares. A Figura 15 apresenta as várias zonas da fornalha onde se encontram instaladas as sondas de temperatura, representadas pelos números de 1 a 11.

As sondas 1,2,3 e 4 medem as temperaturas numa parte mais superior da fornalha/caldeira, enquanto as sondas 5,6,7 e 8 medem as temperaturas ao longo da zona onde se localizam as grelhas. As sondas 1,2,3 e 4 estão a um metro de distância das sondas 5,6,7 e 8. As sondas 9, 10 e 11 medem a temperatura dos gases à saída da caldeira, temperatura dos gases imediatamente antes de estes entrarem no economizador e temperatura dos gases de exaustão, em antes do ventilador de extração dos gases, respetivamente.



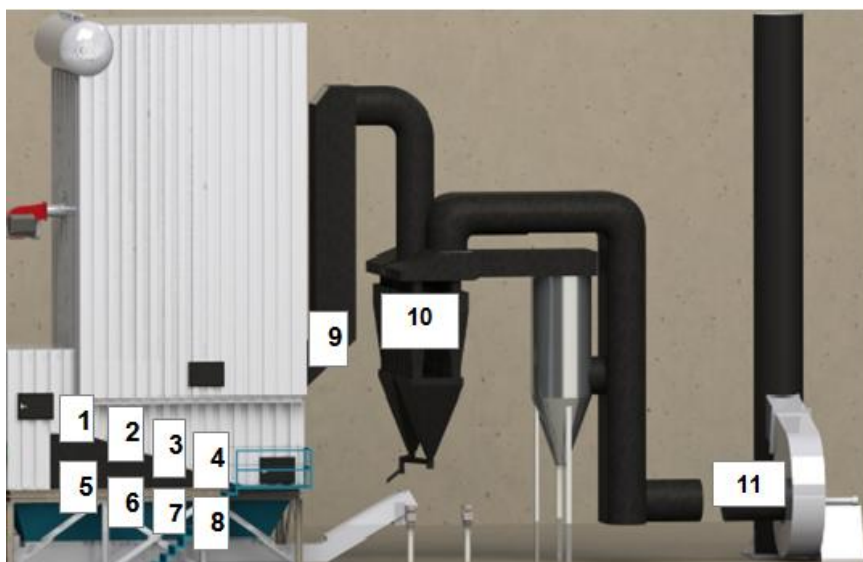


Figura 15 - Corpo da caldeira e respetiva localização das sondas de medição de temperatura.

Um aspeto evidenciado relativo às sondas de medição é que muitas das vezes pode-se ter em curtos intervalos de tempo, uma variação significativa da temperatura medida, evidenciando a boa capacidade que estas sondas possuem em termos de medição. Na Tabela 10 apresenta-se a variação das temperaturas quando temos diferentes tipos de biomassa a serem queimados na fornalha.

Tabela 10 - Exemplo da variação das temperaturas na fornalha com a utilização de diferentes combustíveis.

<b>Zonas de medição de temperatura</b>	<b>Cama de aviário (casca de arroz)</b>	<b>Cama de aviário (casca de arroz + aparas de madeira)</b>	<b>Cama de aviário (Casca de arroz + estilha)</b>
<b>Temperatura (°C)</b>			
Fornalha 1	807	369	1060
Fornalha 2	493	356	780
Fornalha 3	456	483	953
Fornalha 4	477	896	901

O teor de humidade da biomassa situou-se nos 51% em massa para a cama de aviário com aparas de madeira, 47% massa para a cama de aviário (casca de arroz) e 32% em massa para cama de aviário com estilha.

Ainda no que toca à medição de temperatura, mais precisamente medição de temperatura nas tubagens onde circula o vapor saturado produzido pela instalação de combustão, utilizou-se um medidor de temperatura de elevada precisão ( $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ ) que opera numa gama de temperaturas situada entre os  $-30^{\circ}\text{C}$  e os  $550^{\circ}\text{C}$ . Este aparelho,

da marca Dewalt, permite a medição de temperatura à distância através da emissão de um laser para o ponto onde se pretende saber o valor de temperatura. Na Figura 16 observa-se o aparelho em questão.



Figura 16 – Medidor de temperatura.

### **3.3.2. Emissão de gases**

Um aspeto relevante em termos de melhoria das condições de combustão é perceber se a fornalha está a ter um bom desempenho em termos ambientais, sendo as emissões gasosas um parâmetro importante a analisar. A análise ao efluente gasoso permite saber quais os componentes que estão dentro dos valores legais e estudar medidas para minimizar as emissões das espécies químicas que se encontram fora desses limites.

Relativamente à temperatura do efluente gasoso, é possível saber este parâmetro em quatro pontos distintos da fornalha: à saída da caldeira, à saída do economizador, à saída do captador e a seguir ao ventilador de extração dos gases.

#### **3.3.2.1 Medição dos gases de combustão**

A medição dos gases efetuou-se na fábrica, através de um sistema de medição disponível para o efeito. Está-se a falar mais propriamente de um analisador de combustão, tratando-se de um sistema mais abrangente. Este sistema contempla uma sonda de medição, dispositivo de análise, captadores de pressão e software de instalação para computador. Na Figura 17 é possível observar a sonda de medição inserida na tubagem por onde passam os gases de exaustão.



Figura 17 - Sonda de medição de gases inserida na tubagem de transporte dos gases de exaustão.

As amostragens de gases foram efetuadas por método extrativo. O procedimento adotado para realizar a monitorização da composição do gás consistiu em colocar a sonda de amostragem/monitorização na tubagem de transporte dos gases de exaustão e respetiva conexão entre o equipamento de medição e o software. No software faz-se a escolha da instalação de combustão, o tipo de biomassa queimado, a frequência da medição e quais os parâmetros que se pretendem medir. Finalmente dá-se início à medição e esta termina quando o utilizador der ordem para tal. Os parâmetros que podem ser medidos são a concentração de gases resultantes da combustão ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO$  e  $SO_2$ ), temperatura, velocidade dos gases de exaustão e razão estequiométrica.

Na Tabela 11 estão representados os métodos, os limites de deteção e respetiva precisão de análise para cada parâmetro.

Tabela 11 - Gamas de análise do aparelho de medição.

Parâmetro	Método	Limites	Precisão
O <sub>2</sub>	Eletroquímico	0 a 21%	±0,2%
			±10 ppm (0 até 200 ppm)
			±5 vm (201 até 2000 ppm)
CO	Eletroquímico	0 a 8000 ppm	±10 vm (2001 até 8000 ppm)
CO <sub>2</sub>	Calculado	0 a 21%	-
			±5 ppm (0 até 100 ppm)
NO	Eletroquímico	0 a 5000 ppm	±5 vm (101 até 1000 ppm)
			±5 ppm (0 até 100 ppm)
SO <sub>2</sub>	Eletroquímico	0 a 5000 ppm	±5 vm (101 até 5000 ppm)

### 3.4. Operação da instalação de combustão

No funcionamento da fornalha, destacam-se duas fases distintas, o arranque e a paragem. A fornalha é ativada todas as segundas-feiras de tarde, pois é neste período que a fábrica já dispõe de matéria-prima para transformar, iniciando-se de seguida a ativação dos equipamentos das linhas de transformação. O arranque inicia-se em dois modos distintos, manual ou automático. No modo manual, o operador, através do painel de controlo da caldeira, liga a insuflação de ar, de seguida ativa a alimentação e começa a entrar biomassa na caldeira. Verifica-se que a combustão não ocorre de imediato, pois a temperatura ainda não é suficientemente alta para tal. Antes de ativar a fornalha, o operador faz a verificação de todos os sistemas de modo a averiguar se tudo está a funcionar corretamente.

A ativação em modo automático é mais eficiente e recomendada, uma vez que há uma regulação eficiente das condições de ar e combustível e, além disso, a combustão ocorre mais rapidamente.

Durante a fase de arranque, em modo manual, é habitual ocorrerem algumas explosões, enquanto a temperatura ainda não atingiu o valor ideal para a caldeira entrar no modo de funcionamento automático (esta transição verifica-se quando a temperatura supera os 450°C). Além disso, é habitual os gases de exaustão trazerem consigo partículas de maiores dimensões, resultantes da condensação ocorrida durante o período de paragem da caldeira. Apesar de a caldeira ter um período de paragem de

cerca de dois dias (de sábado à tarde até segunda à tarde), as temperaturas no interior da fornalha rondam os 150°C, evidenciando o eficiente sistema de isolamento que integra a caldeira.

Quando a fornalha/caldeira está em pleno funcionamento, começa então a chegar vapor saturado de forma gradual à fábrica.

Relativamente à paragem da fornalha/caldeira, podemos ter duas situações distintas. Uma dessas situações é determinada conforme as necessidades de vapor para o processo, ou seja, a fornalha/caldeira entra no modo de desligar por pressão, fazendo paragens periódicas, quando as necessidades de vapor são reduzidas ou inexistentes. Quando se atinge a pressão máxima do vapor na caldeira (cerca de 14,55 bar), deixa de ser alimentado combustível e ar de combustão à fornalha. Este processo faz diminuir a produção de vapor, voltando a estabilizar quando as necessidades de vapor voltam a ser restabelecidas. A outra situação surge quando a fornalha está sujeita a períodos de paragem mais longos (por exemplo, quando é necessário fazer a revisão e limpeza, ou quando a fábrica encerra no fim de semana).

### 3.5. Avaliação do rendimento da fornalha

O rendimento térmico de um sistema de combustão é um parâmetro importante a ter em conta para o projeto de um sistema de combustão. Existem várias formas para determinar o valor de rendimento, no entanto, uma expressão válida é apresentada na Equação 3.

$$\eta = \frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{biomassa}} + P_{\text{ar}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

$P_{\text{vapor}} = \dot{m}_{\text{vapor}} \times \Delta h$ , com P em [kW];

$P_{\text{biomassa}} = \dot{m}_{\text{biomassa}} \times \text{PCI}_{\text{btq}}$ , com P em [kW];

$P_{\text{ar de combustão}} = \dot{m}_{\text{ar}} \times C_{p \text{ ar}} \times (T_{\text{ar}} - T_{\text{ref}})$ , com P em [kW];

Numa fase posterior do trabalho é apresentado o valor de rendimento determinado com base na equação 3. As perdas na fornalha/caldeira podem ser determinadas utilizando a equação 4.

$$\text{Perdas relativas} = \frac{P_{\text{gases}}}{P_{\text{biomassa}} + P_{\text{ar de combustão}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

onde:

$$P_{\text{gases}} = \dot{m}_{\text{gases}} \times \bar{C}_{p \text{ gases}} \times (T_{\text{gases}} - T_{\text{ref}}), \text{ com } P \text{ em [kW]}$$

É importante referir que para o cálculo das perdas estar completo era necessário contabilizar a energia perdida através das cinzas e através das paredes da fornalha. Numa fase posterior do trabalho é apresentada o valor de perdas em percentagem, com base na equação 4.

### 3.6. Produção de cinzas

Em média, por cada 120 toneladas de combustível queimado, vinte por cento são cinzas, ou seja, são produzidas diariamente aproximadamente vinte e quatro toneladas de cinzas, onde cerca de 90% dessa produção são cinzas de fundo e os restantes 10% são cinzas volantes. Esta elevada quantidade de cinzas exige uma operação de logística por parte dos operadores, como já foi referido anteriormente.

As cinzas produzidas são também um indicador importante para perceber se a combustão está a decorrer corretamente. Se o combustível não estiver a ser queimado devidamente, isto vai-se refletir nas características das cinzas produzidas, ou seja, pode-se ter cinzas com mais teor de inqueimados, por exemplo. Uma outra questão tem a ver com a utilização das cinzas produzidas. Uma análise às cinzas vai permitir saber onde se pode aplicar as mesmas (diretamente no solo ou para outros fins) ou se é necessário algum tratamento adicional.

Um problema habitual em relação às cinzas é o facto de estas, muitas das vezes, saírem fundidas, devido às elevadas temperaturas da fornalha. Na Figura 18 evidencia-se uma amostra de cinzas fundidas.

As cinzas resultantes da combustão são encaminhadas para centros de recolha, de modo a serem utilizadas como fertilizantes orgânicos.

A análise das cinzas foi realizada por uma empresa externa, que trabalha com o grupo Lusiaves, sendo a apresentação e análise dos resultados obtidos efetuada numa fase posterior do trabalho.



Figura 18 - Cinzas fundidas resultantes da combustão de cama de aviário.

### **3.6.1. Determinação do teor de humidade e de inqueimados**

A determinação do teor de inqueimados e de humidade de uma amostra de cinzas (fundo e volantes) teve lugar no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

A amostra utilizada para análise foi recolhida quando a fornalha se encontrava em pleno funcionamento e com as condições operatórias constantes.

Para a determinação do teor de humidade de uma amostra de cinzas seguia-se o seguinte procedimento: efetuou-se a pesagem do prato e fez-se o registo da pesagem, em seguida colocou-se a amostra de cinza volante e a de cinza de fundo em cada um dos pratos e efetuou-se a pesagem do conjunto. Numa fase final procedeu-se à colocação do conjunto na mufla a 105°C durante uma hora e registou-se o valor da massa do conjunto. Para saber o teor de humidade fez-se a diferença entre a massa total do conjunto, antes de ir à mufla menos a massa do conjunto em depois de ir à mufla.

Para saber a percentagem de inqueimados segue-se a norma CEN/TS 14775:2004, sendo o procedimento descrito em anexo.

#### 4. Resultados da monitorização da instalação de combustão

Neste capítulo, em primeiro lugar, apresenta-se e discute-se alguma informação relativa à Campoaves-UTS. São apresentados e discutidos diversos resultados obtidos durante a combustão da cama de aviário e da mistura de cama de aviário com estilha, nomeadamente, perfis de temperatura, humidade da biomassa, concentração das várias espécies gasosas nos gases de combustão, entre outras grandezas.

##### 4.1. Registo de consumo de combustíveis e produção vapor

###### 4.1.1. Consumo de combustíveis

Foi efetuado um breve levantamento do tipo e respetiva quantidade de combustíveis consumidos nas várias caldeiras integrantes da Campoaves-UTS e feita uma estimativa entre a produção de vapor de água e o consumo de biomassa por parte da fornalha alimentada a cama de aviário. O estudo das condições operatórias da fornalha a biomassa foi feito com base em alguma informação disponibilizada e também tendo em conta alguns estudos feitos durante o acompanhamento e permanência na unidade fabril.

A fornalha encontra-se instalada na empresa desde julho de 2014. No entanto, até à data de concretização deste trabalho, diversas melhorias ao sistema estavam em curso e outras em vias de ser implementadas.

Na Tabela 12 são apresentados valores de consumo de combustíveis pelas caldeiras presentes na fábrica.

Tabela 12 – Consumo de biomassa (estilha e cama de aviário) pelas fornalhas e de gás natural pelas outras caldeiras.

Meses	Gás natural (ton)	Estilha (ton)	Cama de aviário (ton)
Janeiro de 2015	50,21	178,50	1929,00
Fevereiro de 2015	50,58	127,50	1553,00
Março de 2015	113,95	357,00	1359,00
Abril de 2015	51,32	153,00	1948,00
Total	266,06	816,00	6789,00

Estes consumos têm por base o diferencial entre a quantidade que se possuía no início de cada mês e a quantidade disponível no final de cada mês.

Fazendo uma breve análise à Tabela 12 verifica-se que a cama de aviário é o combustível mais utilizado para a produção de vapor para o processo produtivo. O consumo de gás natural é quase sempre constante, exceptuando o mês de março. Tal aumento verificado no consumo de gás natural deve-se a alguns problemas que ocorreram com a fornalha/caldeira a biomassa, impossibilitando a sua utilização



durante alguns dias.

De salientar ainda que poderia-se obter uma estimativa do consumo de energia na produção de vapor considerando a alimentação de biomassa (cama de aviário e estilha de medeira) à instalação de combustão, com um PCI médio de 15000 kJ/kg e um PCI de 38000 kJ/kg para o gás natural. No entanto, dado o reduzido período de estudo e a inexistência de alguma informação relevante para proceder a realização deste estudo, optou-se por não realizar esta estimativa.

#### **4.1.2. Produção de vapor**

O vapor é essencial para o desenrolar de todo o processo produtivo. Está-se a falar de vapor saturado que chega às linhas de transformação a uma pressão média de cerca de 11 bar e uma temperatura que se situa entre os 160°C (pressão de saturação = 6 bar e os 190°C (pressão de saturação = 14,5 bar). A fornalha/caldeira APT 40/20 da Flucal produz em média entre 15 a 20 ton/h de vapor saturado a uma pressão média de 13,5 bar.

De modo a saber qual o regime diário de produção de vapor foi feita uma análise aos registos de produção de vapor de o mês de abril do presente ano. A escolha do mês de abril deve-se ao facto de neste mês a fornalha ter tido um funcionamento bastante estável. Esta informação, fornecida pela empresa responsável pelo desenvolvimento e instalação da fornalha, apresentava dados medidos de 15 em 15 minutos da produção de vapor ao longo do dia. De forma a tornar a informação mais fácil de analisar foi traçado um perfil diário e mensal da produção média de vapor, sendo os resultados visíveis na Figuras 19 e 20, respetivamente.

Fazendo uma breve análise da figura relativa à produção média diária, constata-se que esta produção é muito variável ao longo do dia. O período da noite manifesta quase sempre uma boa produção de vapor devido ao funcionamento em pleno das diversas linhas de produção da fábrica, associada a uma maior quantidade de matéria-prima a transformar. Este aspeto permite que a fornalha opere de forma mais estável. Também na Figura 19 é possível analisar a influência da pressão na produção de vapor, ou seja, pressões do vapor na caldeira mais elevadas traduzem-se quase sempre numa boa produção de vapor. Os dias em que a produção está baixa, como observado na Figura 20, dizem respeito aos domingos, sendo que normalmente neste dia da semana a fábrica não se encontra em laboração. De modo geral, este regime de produção de vapor diário varia também de acordo com os problemas que vão surgindo ao longo do funcionamento e operação da fornalha industrial. Fatores como a já referida pressão do vapor na caldeira, as temperaturas, alimentação de biomassa e as baixas necessidades de vapor para a fábrica, determinam a variação acentuada da produção de vapor.

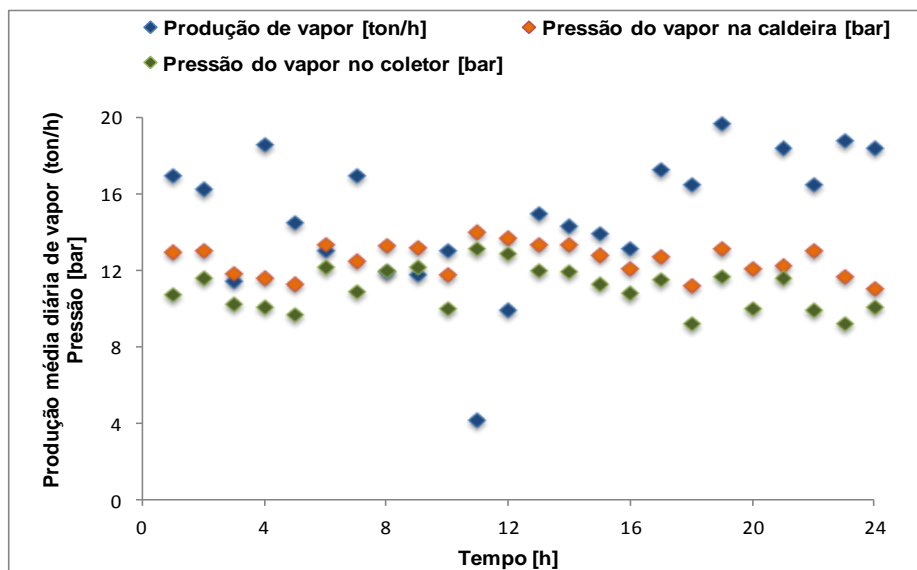


Figura 19 - Produção média diária de vapor pela caldeira, pressão do vapor na caldeira e pressão do vapor no coletor.

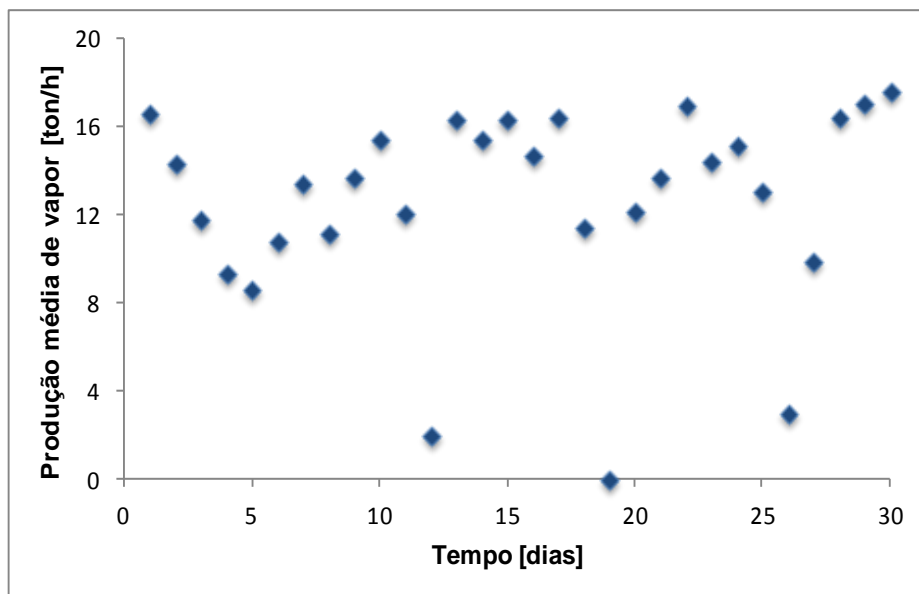


Figura 20 - Produção média mensal de vapor pela caldeira.

Em relação às temperaturas, verifica-se que não é necessário ter temperaturas de 1000°C ou mais para ter uma boa produção de vapor. Além disso ao atingir tais temperaturas, está-se a promover a fusão das cinzas resultantes da combustão, reduzindo assim o tempo de vida útil da instalação de combustão. Temperaturas da fornalha situadas entre os 500 e os 800°C também permitem a obtenção de uma boa quantidade de vapor. A alimentação de biomassa é de todos os fatores o que apresenta maior relevância, pois sem biomassa a fornalha não funciona. É importante

garantir que o caudal de biomassa alimentado à caldeira seja o mais uniforme possível e ter especial atenção quando essa biomassa está demasiado húmida, pois tal facto leva à redução da quantidade de biomassa que chega até à fornalha/caldeira.

Uma outra situação tem a ver com o controlo da quantidade de vapor que chega ao processo. Através dos computadores presentes na sala de comandos da fábrica é possível regular a percentagem de vapor que chega ao processo. Se o operador pedir uma grande percentagem de vapor, num curto intervalo de tempo, a fornalha/caldeira pode não conseguir estabilizar essa mesma produção de vapor.

Em suma, constata-se que se todos estes fatores descritos forem tidos em conta, é possível garantir vapor em quantidades suficientes para o processo produtivo. Um outro aspeto importante é o de que quando não há necessidades de vapor no processo produtivo (as linhas de transformação estão paradas), o vapor produzido continua a ser aproveitado para limpeza dos secadores e outros componentes responsáveis pela transformação da matéria-prima. Além disso o vapor é também usado para aquecimento dos tanques de gordura e uma parte é utilizada no oxidor (equipamento que permite fazer o tratamento dos odores resultantes do processo de transformação de subprodutos). Ao fazer este aproveitamento do vapor, está-se a tornar o processo mais eficiente, evitando o desperdício.

#### **4.2. Temperaturas, frequência da alimentação de biomassa e frequência insuflação de ar de combustão**

Durante um dia típico de funcionamento da fornalha industrial pode-se ter grandes variações ao nível de temperatura, pressão, frequência de alimentação e insuflação de ar, principalmente quando se queima cama de aviário. Na Figura 21 são apresentados a evolução destas variáveis ao longo de um dia de funcionamento normal da fornalha, durante a combustão de cama de aviário. De referir que a velocidade das grelhas, o tipo de combustível alimentado, percentagens de insuflação de ar permaneceram constantes, sendo variáveis o teor de humidade e caudal de combustível e o caudal de ar admitido à fornalha.

Em relação à evolução das temperaturas constata-se que estas apresentam uma variação significativa ao longo do dia. Estas variações devem-se a quatro principais fatores constatados durante o acompanhamento da fornalha industrial:

- conteúdo em humidade variável do combustível;
- problemas que vão surgindo durante o funcionamento da fornalha;
- tipo de biomassa queimado e;
- regime de funcionamento da fornalha.

Na situação presente na Figura 21, quanto às temperaturas, verifica-se que estas apresentam variações significativas ao longo do dia. Nesta situação em concreto, o combustível utilizado foi cama de aviário, que como se observa através da temperatura na zona inicial da fornalha (TF1), apresentou um teor de humidade elevado durante a madrugada, traduzindo-se numa menor temperatura. A partir do início da manhã, essa temperatura subiu, devido à presença de um combustível mais seco. Quanto às restantes temperaturas medidas nas outras zonas da fornalha, estas mantiveram-se altas, sendo este o perfil verificado quando o combustível apresenta

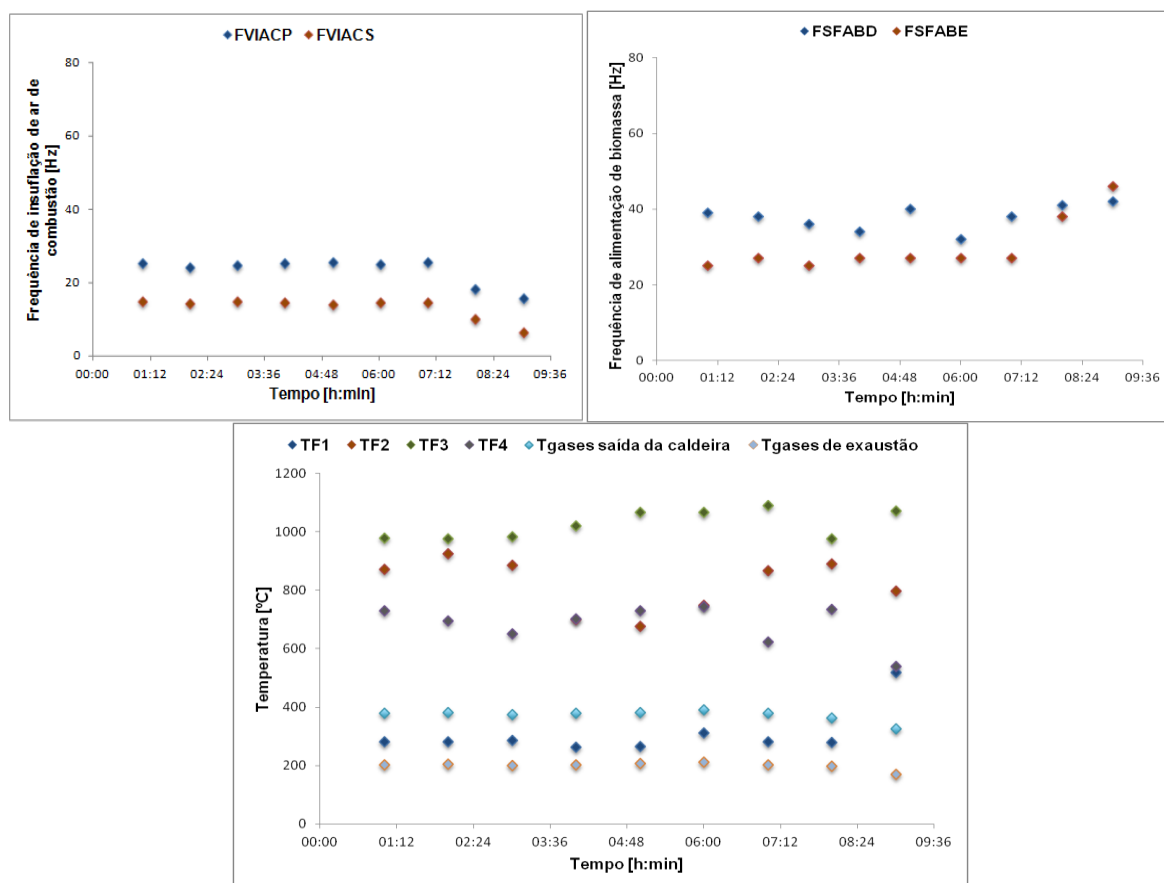


Figura 21 - Evolução das temperaturas, frequência do sem fim de alimentação de biomassa (direito e esquerdo) (FSFABD e FSFABE) e frequência do ventilador de insuflação de ar de combustão (primário e secundário) (FVIACP e FVIACS) ao longo de um dia normal de funcionamento da fornalha com cama de aviário.

A evolução da frequência de funcionamento dos ventiladores de insuflação de ar de combustão depende do combustível que está a ser alimentado à fornalha/caldeira e das temperaturas na fornalha. Na situação apresentada na Figura 21, observa-se que a evolução da frequência de insuflação de ar coincidiu com a evolução das temperaturas da fornalha (TF2, TF3 e TF4). Outro aspeto extraído da Figura 21 é a questão da frequência de alimentação de biomassa. Quando a temperatura no interior da fornalha é mais baixa, tem-se uma frequência de alimentação de biomassa mais elevada, de modo a aumentar a quantidade de combustível admitido à fornalha.

A Figura 22 mostra a evolução de determinados parâmetros durante um período de tempo de funcionamento da fornalha, com a combustão de estilha com um teor de humidade de aproximadamente 20% em massa.

Na evolução verificada na Figura 22, comparativamente com a verificada na Figura 21, tem-se temperaturas mais altas, frequências de insuflação de ar e de alimentação mais elevadas. Nesta situação em concreto foi ainda possível contabilizar o caudal admitido à instalação de combustão, uma vez que o sistema de monitorização de caudal já se encontrava operacional. Como se pode constatar através da Figura 22,

pode-se ter caudais baixos ou elevados. Esta quantidade de caudal admitido à fornalha/caldeira está diretamente relacionado com as características da biomassa que está a ser queimada na instalação de combustão.

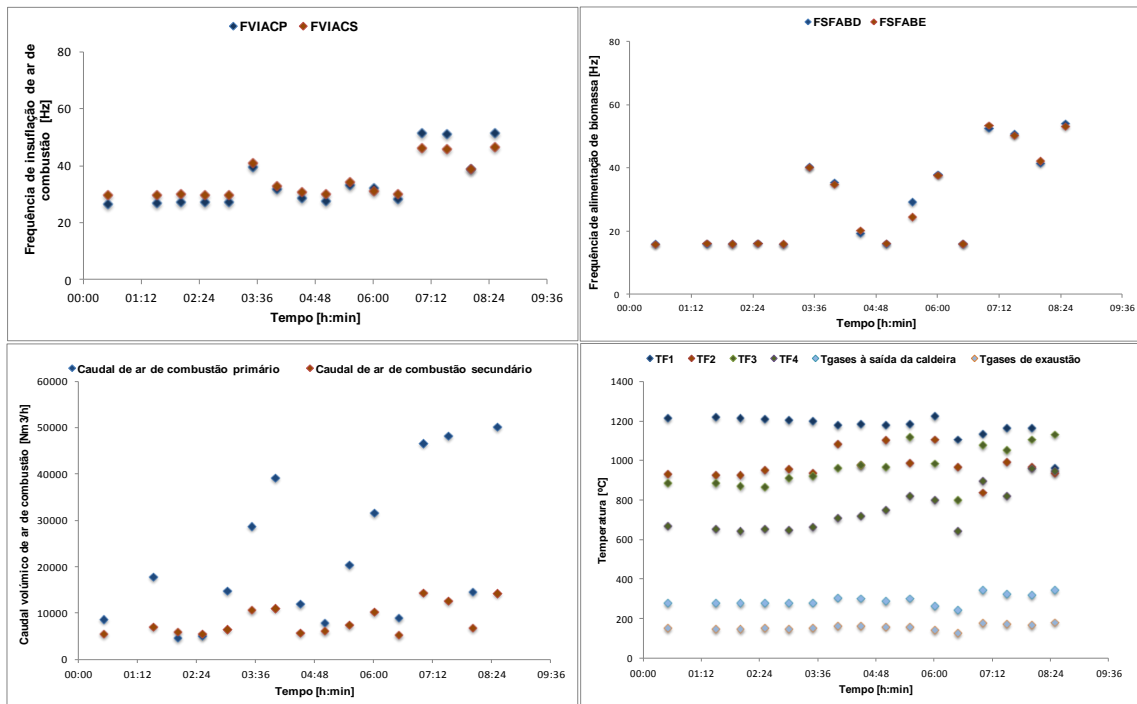


Figura 22 - Evolução das temperaturas, frequência de insuflação de ar de combustão (primário e secundário) (FVIACP e FVIACS) e do sem fim de alimentação de biomassa (esquerdo e direito) (FSFABD e FSFABE) ao longo de um dia normal de funcionamento da fornalha.

### 4.3. Utilização de diferentes combustíveis

Durante o período de permanência na fábrica verificou-se que a cama de aviário não era o único combustível utilizado na fornalha industrial, como referido anteriormente. Foram várias as alturas em que se utilizou cama de aviário juntamente com estilha ou somente estilha como alimentação. A utilização de estilha é motivada por três fatores principais: auxiliar na remoção de sujidade presente nos parafusos sem fim, por carência de cama de aviário e por excesso de humidade na cama de aviário.

#### 4.3.1. Cama de aviário com estilha

Procedeu-se então a um breve estudo para perceber qual a influência no funcionamento da fornalha e respetivas emissões de gases na utilização de cama de aviário juntamente com estilha. Na Figura 23 é possível verificar o comportamento de diferentes componentes presentes nos gases de combustão, bem como da evolução da temperatura dos gases à saída da caldeira, ao longo do tempo.

A medição teve uma duração de 5 horas, não sendo possível efetuar uma medição mais prolongada por problemas relacionados com o entupimento da sonda de medição

com partículas presentes no efluente gasoso.

Em relação aos resultados apresentados na Figura 23 pode-se concluir que se estava perante uma combustão incompleta, uma vez que se obteve valores de CO em alguns períodos da medição, e além disso observou-se que os fumos que saíram da chaminé apresentaram uma cor um pouco mais escura nesses períodos. Apesar de haver a presença de CO, a quantidade obtida é muito inferior ao limite legal estabelecido relativo às emissões de poluentes em Portugal (cerca de 500 mg/Nm<sup>3</sup>). Quanto à percentagem de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> constata-se que estas são um pouco variáveis ao longo do tempo. Enquanto a percentagem de O<sub>2</sub> baixa, a de CO<sub>2</sub> aumenta. A razão estequiométrica medida sofreu uma redução contínua ao longo do período de medição. Numa fase inicial, devido a dois períodos de pára arranca da caldeira, a razão estequiométrica teve valores mais elevados, estabilizando quando esta situação não se verificou. Quanto à questão das temperaturas da fornalha, estas apresentaram um comportamento bastante estável ao longo da medição, bem como a temperatura de saída dos gases da caldeira evidenciando que o teor de humidade do combustível permaneceu relativamente estável. Ao nível da concentração de NO, constata-se que razões estequiométricas mais baixas contribuem para uma menor concentração deste componente nos gases de exaustão. A concentração de um outro elemento no efluente gasoso, o dióxido de enxofre, mostrou-se relativamente baixa ao longo da medição, sendo nula durante o maior parte do tempo.

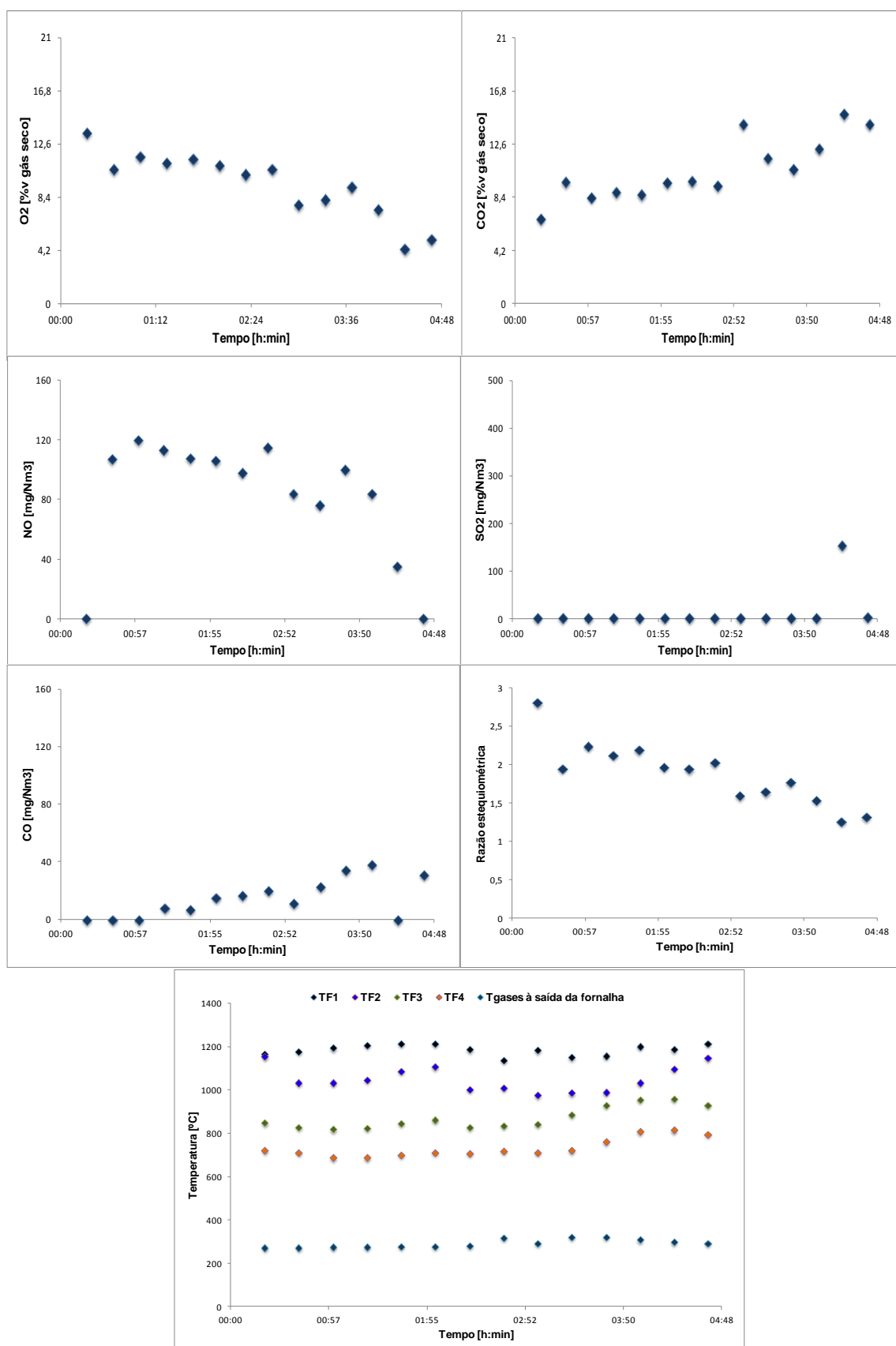


Figura 23 - Comportamento dos diversos componentes gasosos (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO e NO) presentes nos gases de exaustão, razão estequiométrica e temperaturas durante a combustão de cama de aviário com estilha.

#### **4.3.2. Utilização da cama de aviário**

A cama de aviário foi o combustível mais utilizado durante o período de permanência na empresa. Este combustível caracteriza-se por ser muito instável, principalmente ao nível da humidade presente e composição.

Efetuiu-se uma medição diária de modo a perceber com mais detalhe a combustão da cama de aviário, analisando-se os componentes presentes nos gases resultantes da combustão e outros parâmetros relevantes para o efeito.

As condições operacionais ao longo do dia foram praticamente estáveis, no entanto, houve um parâmetro que não foi possível controlar, sendo esse parâmetro a humidade que rondou os 22% em massa.

Na Figura 24 evidencia-se o comportamento ao longo do tempo dos diversos parâmetros medidos.

Da análise à Figura 24 observa-se que as temperaturas na fornalha se mantiveram altas durante o período de medição, uma vez que a humidade do combustível era reduzida. No entanto estas temperaturas sofreram variações significativas durante a medição, verificando-se esta situação sempre que se queima cama de aviário.

Quanto à variação dos diversos componentes presentes no efluente gasoso, no que toca ao CO, quase não se verifica concentração deste componente, dando indicação de que a combustão foi praticamente completa. No que respeita à presença de O<sub>2</sub>, constatou-se que a percentagem deste componente foi relativamente baixa durante a maior parte da medição, tendo-se verificado uma redução contínua, comparativamente com a situação inicial. Já a percentagem de CO<sub>2</sub> teve uma evolução inversamente proporcional. A quantidade de SO<sub>2</sub> manteve-se elevada, uma vez que se estava a queimar somente cama de aviário, combustível este que apresenta enxofre na sua composição, como verificado anteriormente. A quantidade de NO manteve-se reduzida ao longo da medição. Quanto à razão estequiométrica, esta teve uma gama estável ao longo da medição, traduzindo-se num benefício para tornar a combustão mais completa.

Comparando os resultados obtidos nas Figuras 23 e 24, chega-se à conclusão que a queima de diferentes tipos de biomassa traduz-se numa variação significativa das temperaturas da fornalha e emissões gasosas, sendo mais benéfico queimar somente cama de aviário, com um teor de humidade controlado.



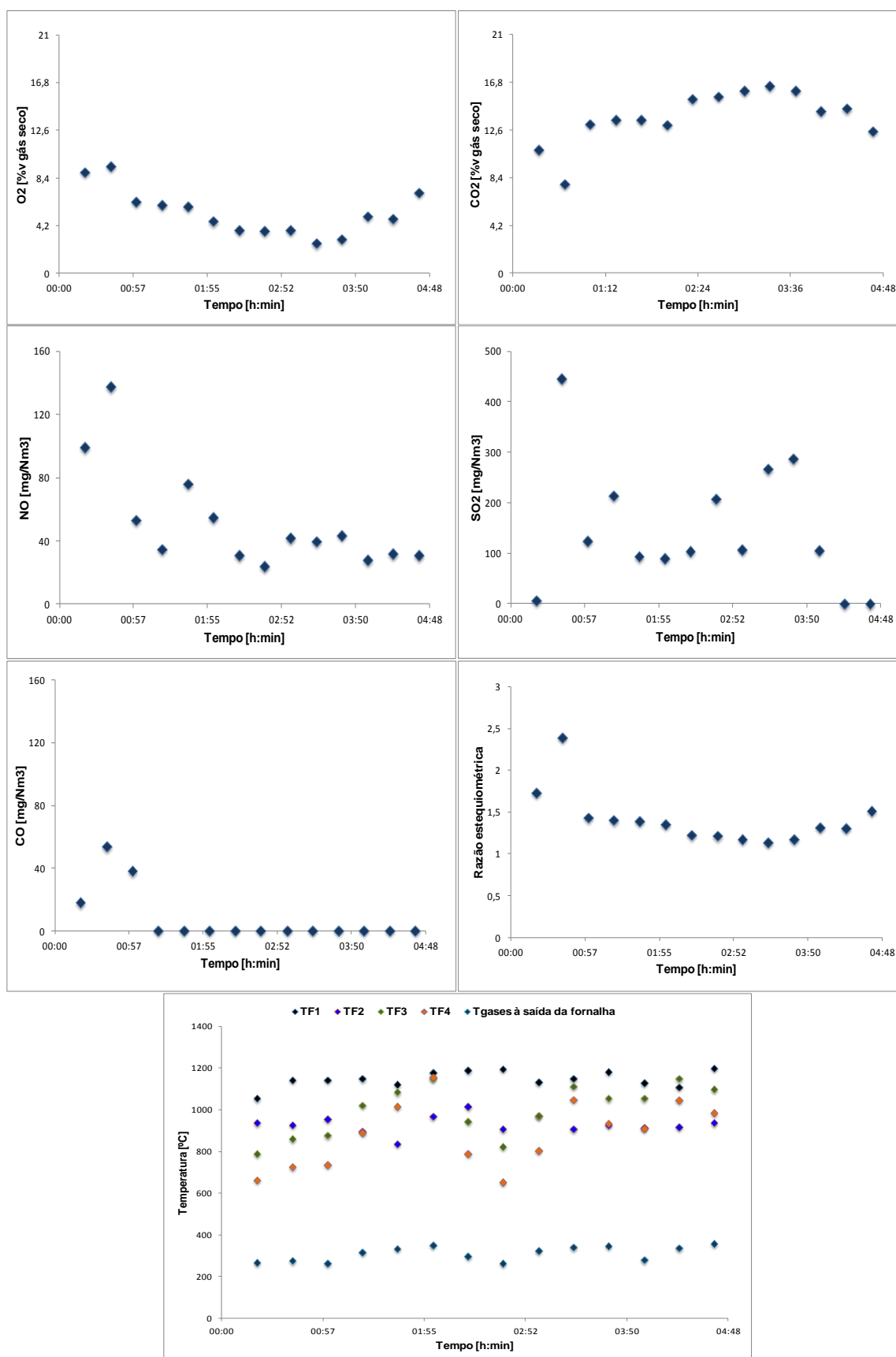


Figura 24 - Comportamento dos diversos componentes gasosos (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO e NO) presentes nos gases de exaustão, da razão estequiométrica e das temperaturas durante a combustão da cama de aviário.

#### 4.4. Influência do teor de humidade do combustível

Nesta situação em concreto, foi estudada o efeito que o teor de humidade do combustível tem sobre combustão. Para isso procedeu-se à análise de duas situações de teor de humidade. Na primeira situação temos cama de aviário com cerca de 33% de humidade em massa e na segunda situação cama de aviário com cerca de 45% de humidade em massa. De salientar que as amostras foram recolhidas em dias distintos e condições de operação da fornalha análogas (velocidade das grelhas e registos de insuflação). Na Figura 25 é possível verificar a influência dos diferentes teores de humidade nas temperaturas da fornalha.

Como evidenciado na Figura 25, o combustível com maior teor de humidade leva a que haja uma diminuição das temperaturas da fornalha. Em contrapartida, menor teor de humidade traduz-se numa temperatura da fornalha superior.

Um outro aspeto a referir tem a ver com a influência do conteúdo de humidade no desenrolar da queima do combustível ao longo da fornalha. Através da observação verificou-se que a queima da biomassa mais húmida ocorreu nas últimas zonas da fornalha, enquanto que a biomassa mais seca entrou em combustão numa zona mais inicial e central da fornalha.

Esta diferença verificada em termos de zonas de chama no interior da fornalha/caldeira é motivada pela duração da fase de secagem do combustível. Combustível mais húmido necessitou de um maior tempo de permanência no interior da fornalha/caldeira antes de se iniciar a sua combustão, pelo que a sua combustão foi mais intensa na zona central e posterior da fornalha. Por sua vez, com um combustível mais seco, a fase de secagem foi mais curta pelo que este queimou entre a zona inicial e a zona central da fornalha/caldeira.

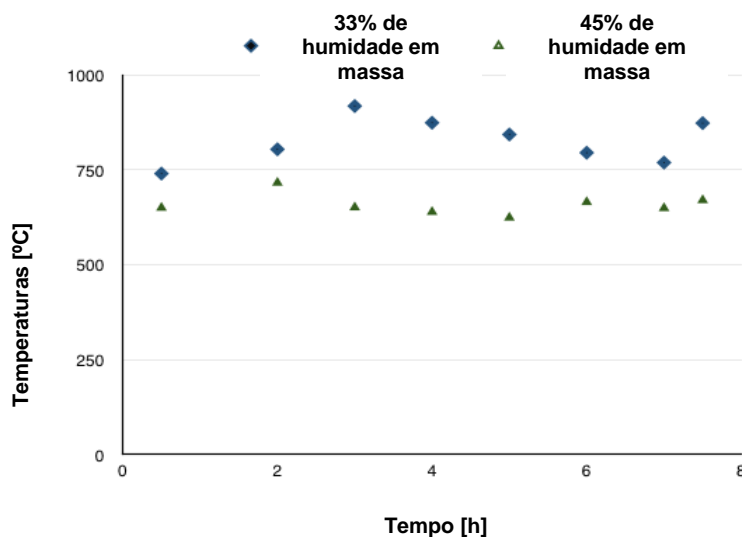


Figura 25 – Influência do teor de humidade nas temperaturas da fornalha.

Procedeu-se ainda a uma pequena análise acerca da influência dos teores de humidade no tempo de paragem do parafuso sem fim de transporte de biomassa. Na Figura 26 é possível observar esta relação.

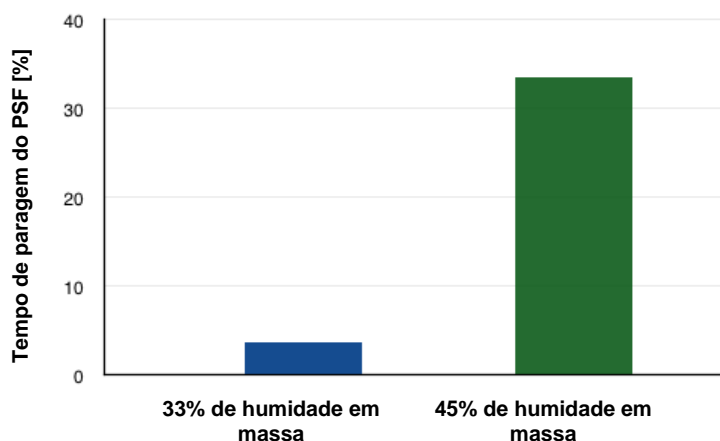


Figura 26 - Influência do teor de humidade da biomassa sobre o tempo de paragem do parafuso sem fim (PSF) de transporte de biomassa à fornalha.

Como se pode ver na Figura 26, quanto maior a humidade do combustível, maior é o tempo de paragem do parafuso sem fim de transporte de biomassa à tolva. De um modo geral o que acontece é que conteúdos de humidade elevados fazem com que haja a formação de uma espécie de “túnel” no interior da tolva, provocando a acumulação de biomassa na tolva. Como dentro dessa tolva há um sensor de nível, e como este, nesta situação, alerta sempre para nível alto, o sem fim de transporte para, segundo a indicação do sensor. Esta acumulação de biomassa na tolva traduz-se numa inevitável redução da alimentação à fornalha/caldeira, tendo consequências negativas nas temperaturas da instalação de combustão e respetiva produção de vapor.

Apesar de na tolva em questão existir um sistema que permite a vibração da mesma, de modo a evitar estas situações, verifica-se que tal sistema é ineficiente para combustível com elevado teor de humidade. De modo a minimizar estas ocorrências, muitas das vezes, os operadores acabam por empurrar o combustível acumulado no interior da tolva, minimizando estes períodos de paragem do sem fim.

Uma outra situação que muitas das vezes passa despercebida tem a ver com a formação de “túnel” no silo de armazenamento. Este aspeto é verificado sempre que há a adição de estilha à cama de aviária mais húmida. Nestas circunstâncias, o sistema de silo de facas mostra-se incapaz de garantir uma extração de quantidade de biomassa estável ao longo do tempo. Nestes casos a única solução é mexer o combustível no interior do silo, evitando que este fique colado às paredes do mesmo.

#### 4.4.1. Armazenamento da biomassa em pilha

Durante o período de permanência na empresa, foram muitas as vezes em que verificou a existência de muita biomassa armazenada, dado a dimensão do pavilhão de armazenamento. Esta biomassa, armazenada em pilha de grandes dimensões (algumas vezes superior a 8 metros), mostrava a necessidade de um controlo mais

eficaz da quantidade de biomassa que chega à fábrica.

Um aspeto que se estudou foi a questão da perda de humidade na biomassa armazenada em pilha de grandes dimensões. Para isso estudou-se ao longo de um mês (período durante o qual se teve armazenamento pilha de grandes dimensões), a questão da perda de humidade neste tipo de condições de armazenamento. Na Figura 27 está presente a planta do pavilhão de armazenamento.

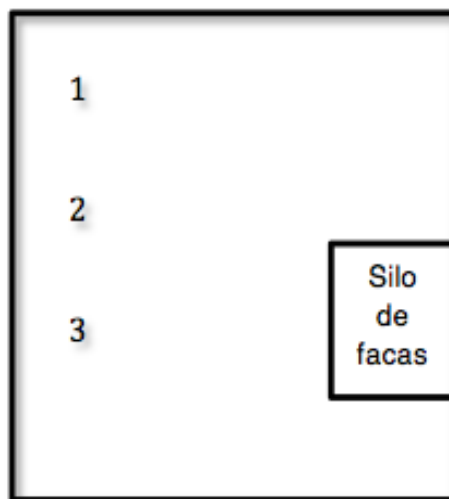


Figura 27 - Planta do pavilhão de armazenamento de biomassa e respetivos níveis de armazenamento estudados.

Através da Figura 27 é possível verificar os diferentes níveis de armazenamento, desde o mais antigo representado pelo número 1, o intermédio representado pelo número 2 e o mais recente representado pelo número 3. No nível 1 tínhamos uma pilha a variar entre os 7 a 8 metros de altura, no nível 2, cerca de 4 a 5 metros e no nível 3 a rondar os 2 a 3 metros de altura.

Ao nível do tempo de armazenamento, no nível 1 temos biomassa armazenada com um tempo de armazenamento superior a 20 dias, no nível 2 entre os 10 a 20 dias e no nível 3, biomassa armazenada com 3 a 10 dias de tempo de armazenamento. Dentro de cada nível de armazenamento procedeu-se à recolha de amostras em diferentes dias e obteve-se valores de humidade situados entre os 33 e 40% em massa para o nível 3, entre os 30 e os 38% em massa para o nível 2 e para o nível 1 entre os 30 e os 35% em massa. Os valores de humidade mencionados podem variar com as condições de armazenamento, ou seja, se a biomassa se encontra armazenada em pilha de grandes dimensões, se chega ao armazém com muita ou pouca humidade, se a temperatura no armazém está elevada ou baixa, a temperatura da biomassa, a estação do ano, entre outros.

Com estes valores chega-se à conclusão que o armazenamento em pilha é benéfico em termos de perda de humidade. No entanto é necessário referir que o armazenamento em pilha de grandes dimensões também tem os devidos inconvenientes. Verificou-se que na pilha situada no nível 1, a degradação biológica da biomassa era elevada, além de haver, no interior da mesma grandes quantidades de material “carbonizado”, muita casca de arroz reduzida a pó e um cheiro intenso a material queimado. Na Figura 28 está presente uma amostra de cama de aviário

carbonizada, resultante do armazenamento em pilha de grandes dimensões. Para evitar tal situação sugere-se tempos de armazenamento mais reduzidos e armazenamento em pilhas de menores dimensões.



Figura 28 - Cama de aviário "carbonizada".

#### **4.4.2. Perda de humidade do combustível ao longo do sistema de alimentação**

Um outro aspeto importante a analisar, prende-se com a importância de perceber se a perda de humidade existente durante o transporte da biomassa até à caldeira é ou não significativo. Para tal, analisou-se o combustível em três pontos distintos do sistema de alimentação, durante o transporte de biomassa, com a caldeira em pleno funcionamento. A primeira amostra foi recolhida à saída do parafuso de extração de biomassa e corresponde ao primeiro ponto. A segunda amostra diz respeito à entrada do combustível na primeira tolva de receção do combustível (junto à caldeira) e é relativa ao ponto dois e por fim a terceira recolha é relativa à biomassa que está numa das tolvas existentes, imediatamente antes de a biomassa entrar na caldeira e corresponde ao ponto três. Na Figura 29 é possível verificar os três pontos de recolha de combustível.

Depois de recolhidas as amostras, efetuou-se a determinação do teor de humidade das mesmas e verificou-se que existe de facto uma perda de água que ronda os 3% em massa, desde o ponto inicial até ao ponto final, sendo algo significativo principalmente quando o combustível se encontra muito húmido.

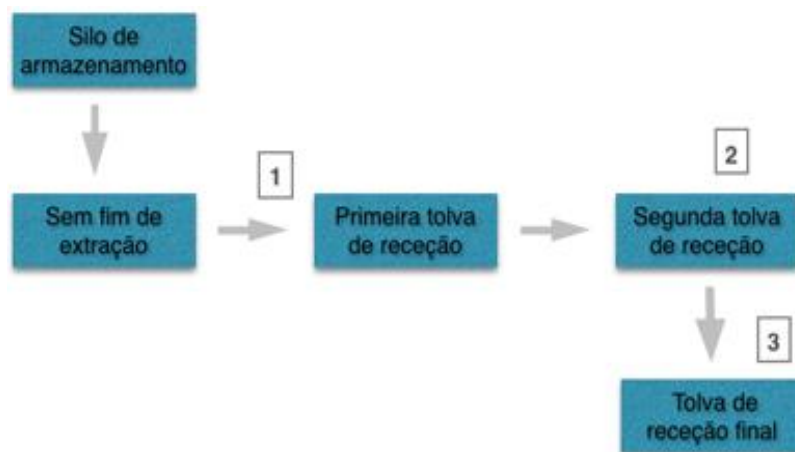


Figura 29 - Localização dos pontos de recolha da amostra de biomassa.

#### 4.5. Análise da amostra de cinzas

Devido à disponibilização de uma análise recente efetuada a uma amostra de cinzas (fundo mais volantes), foi possível contabilizar os vários componentes integrantes da mesma e tirar as devidas conclusões. A análise corresponde a uma amostra (fundo mais volantes) recolhida em Outubro de 2014, sendo a análise mais recente que a empresa possui até à data. Os resultados são expressos em base seca. Na Tabela 13 são apresentados os resultados dessa análise.

Analizando os resultados obtidos constata-se que amostra é rica em diversos elementos, principalmente em cloretos, enxofre, manganês e zinco. O elevado valor de enxofre é característico deste tipo de cinzas, uma vez que a biomassa queimada contém enxofre na sua constituição. Destaca-se ainda a presença de alguns metais pesados, como o chumbo, o mercúrio, o cádmio, níquel, o crómio, o arsénio, constatando-se que a concentração de níquel e de crómio são as mais elevadas. A presença de metais pesados na amostra de cinzas indica que é preciso ter algum cuidado com o manuseamento das mesmas, pois os metais pesados são prejudiciais para os seres vivos.

Outra substância presente em quantidade elevada é a sílica. A elevada presença desta substância é característica da queima de cama de aviário, uma vez que este tipo de biomassa é constituído maioritariamente por casca de arroz.

Quanto à amostra de cinzas, no que respeita ao teor de humidade obteve-se cerca de 33% em massa na cinza de fundo e 4% em massa na cinza volante. O elevado conteúdo de humidade na cinza de fundo deve-se ao facto de estas caírem no redler, sendo que neste sistema, encontra-se água para refrigeração das cinzas. Quanto à percentagem de inqueimados obteve-se cerca de 7% na amostra de cinzas volantes e cerca de 10% nas cinzas de fundo.

Um outro aspeto que importa mencionar relativamente à questão das cinzas, tem a ver com o teor de inqueimados. Verifica-se que para as mesmas condições de operação da fornalha/caldeira, tem-se uma presença maior de inqueimados quando se queima estilha com cama de aviário do que quando se queima apenas cama de aviário. Esta situação pode ser resolvida, fazendo o ajuste correto da velocidade das

grelhas, de modo a favorecer o aumento do tempo de residência da biomassa no interior da fornalha.

Tabela 13 - Valores obtidos resultantes da análise de uma amostra de cinzas (empresa externa).

Ensaio	Método	Resultado	Unidade
Humidade	EN 12880:2000	35.09	%
Matéria orgânica	EN 12880:2000	4.4	%
Matéria seca	EN 12880:2000	64.1	%
Condutividade (20°C)	MI-LAQ-104-02	1595	uS/cm
Cloro residual livre	NP 4307-1:1996	<0,2 (L.Q.)	mg(Cl <sub>2</sub> )/L
Cálcio	EN 13346:2000	20.3	%
Cloretos	EN 12506	4764	mg/kg
Manganês	EN 13346:2000	3367	Mg(Mn)/kg
Cobre	EN 13346:2000	490.4	Mg(Cu)/kg
Zinco	EN 13346:2000	1127.5	Mg(Zn)/kg
Enxofre	CZ_SOP_D06_02_001 (US EPA 200.7, ISO 11885, US EPA 6010, SM 3120, amostras prep CZ_SOP_D06_02_J02	4680	Mg/kg DW
Azoto total		<0,2 (L.Q.)	%
Fósforo total	EN 13346:2000	0.9	%
Chumbo	EN 13346:2000	<10 (L.Q.)	mg(Pb)/kg
Mercúrio	EPA 7473:2007	<0.05 (L.Q.)	mg(Hg)/kg
Cádmio	EN 13346:2000	<0,2 (L.Q.)	mg(Cd)/kg
Níquel	EN 13346:2000	112.2	mg(Ni)/kg
Crómio	EN 13346:2000	160.1	mg(Cr)/kg
pH (25°C)	MI-LAQ-150-02	10,9	-
Alumínio	EN 13346:2000	27,83	mg(Al)/kg
Arsénio	SMEWW 3113-B-21 <sup>a</sup> edição	<1.0 (L.Q.)	mg(As)/kg
Sílica	MI-LAQ-171	466,9	mg/kg
Sódio	EN 13346:2000	1.9	%
Potássio	EN 13346:2000	11.15	%
Magnésio	EN 13346:2000	3.56	%
Ferro	EN 13346:2000	466,9	mg(Fe)/kg

#### 4.6. Emissões de gases

Cerca de duas vezes por ano, uma empresa externa responsável pela medição e análise das emissões, efetua medições através de um sistema de medição que permite medir as características dos gases que estão a circular na chaminé. Foi

possível obter os resultados relativos à última medição efetuada, sendo estes resultados obtidos quando a fornalha industrial se encontrava em plena carga. Os valores obtidos estão presentes na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores medidos de alguns componentes presentes na amostra de gás (empresa externa).

<b>Valores medidos dos vários componentes presentes nos gases</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
O <sub>2</sub>	%	8,7 ± 0,5
CO <sub>2</sub>	%	12,3 ± 0,1
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	865 ± 69 (*)

(\*) Valor determinado e corrigido com o O<sub>2</sub> de referência = 11%, segundo o anexo I, da Portaria n.º 677/2009, de 23 de Junho

Dos resultados obtidos na Tabela 14, observa-se que o valor de CO supera o limite legal estabelecido (cerca de 500 mg/Nm<sup>3</sup>), sendo um indicador de que a combustão se encontrava muito incompleta na altura da medição. Para ter valores legais de CO é necessário que haja os devidos ajustes em termos de tempo de residência do combustível na fornalha/caldeira, temperaturas e humidade do combustível.

#### 4.7. Balanços de massa e de energia ao sistema de combustão

Os balanços de massa e de energia permitem de certo modo determinar algumas variáveis importantes para a caracterização do sistema de combustão e análise da própria combustão.

Os balanços de massa e de energia que se seguem foram realizados tendo por base a utilização de cama de aviário, uma vez que se tratou do combustível mais utilizado durante o período de estágio. Quanto à utilização de estilha de madeira, foi determinado o valor de PCI deste combustível (tendo em conta a características presentes na Tabela 7 e utilizando as equações 1 e 2), que rondou os 17 MJ/kg<sub>bs</sub>.

Quanto ao balanço de massa, na Figura 30 pode-se constatar os inputs e outputs considerados para efetuar o tal balanço.

Na Figura 30, o ar de combustão contempla o ar primário e o ar secundário. Quanto às cinzas, tem-se as cinzas volantes e de fundo e em relação aos gases fazem parte o CO<sub>2</sub>, o O<sub>2</sub>, o NO e o CO. Na Tabela 15 são apresentados os valores médios utilizados para a realização do balanço de massa.

Para o balanço foi adotada a composição do combustível designada por cama de aviário 3, presente na Tabela 7. Numa fase posterior houve a determinação do ar estequiométrico por hora fazendo a multiplicação da quantidade de ar estequiométrico por quantidade de biomassa em base seca pela quantidade de biomassa em base seca por hora (5 ton/h).



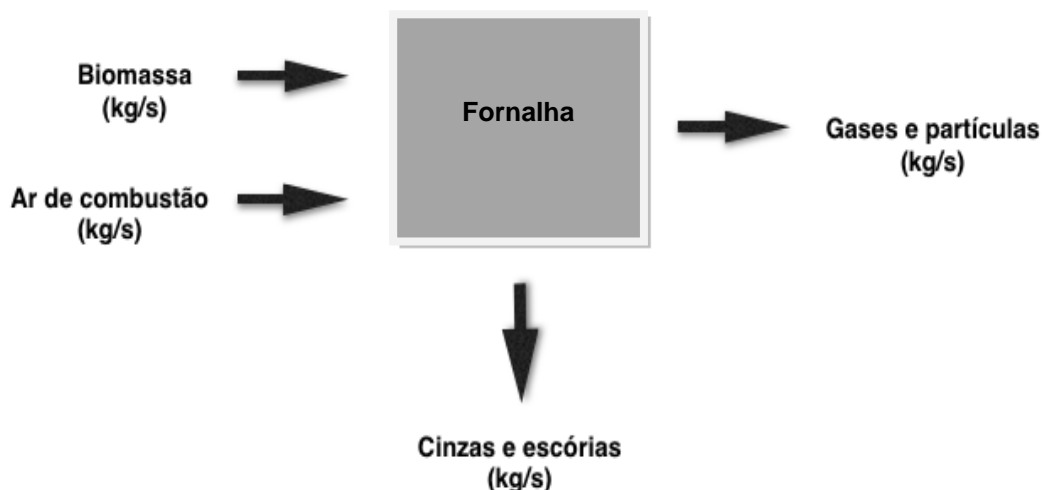


Figura 30 - Balanço de massa.

Tabela 15 - Valores médios utilizados para o balanço mássico.

Parâmetros	Valores médios
Caudal mássico de biomassa (kg/s)	1,4
Caudal volúmico normalizado de ar de combustão (m <sup>3</sup> /h)	35000
Caudal mássico de ar de combustão (kg/s)	10,8
Caudal mássico dos gases de exaustão (kg/s)	11,0
Caudal mássico de cinzas (kg/s)	0,2
PCI (kJ/kg) <sub>btq</sub>	9131

De seguida obteve-se o valor da razão estequiométrica através do quociente entre o caudal volúmico de ar de combustão e a quantidade de ar estequiométrico por hora. O valor obtido, cerca de 1,65, aproxima-se do valor típico para os sistemas de combustão, cerca de 1,5.

Quanto à questão do balanço de energia (evidenciado na Figura 31), optou-se por determinar as variáveis que seriam necessárias para determinar o valor de rendimento térmico da instalação de combustão. Calculou-se a potência do vapor, a potência do ar de combustão (ar quente) e o PCI em btq, sendo estas as grandezas necessárias para o cálculo da eficiência da instalação de combustão.

Na Tabela 16 são apresentados os valores médios de alguns parâmetros (valores médios) adotados para o cálculo da eficiência da instalação de combustão. Através das grandezas referidas na Tabela 16 procedeu-se ao cálculo do rendimento pela equação 3, tendo-se obtido um valor de cerca de 80%, significando que se está perante um sistema de combustão eficiente, tendo em conta o combustível utilizado. As perdas de energia, contabilizando apenas a energia perdida através dos gases de combustão determinadas com base na equação 4 rondam os 10%. Tendo em conta este valor chega-se à conclusão que o valor obtido é bastante elevado, uma vez que

não foram consideradas as perdas de energia nas cinzas e através das paredes da fornalha. Dá bibliografia consultada, as perdas através das paredes da fornalha correspondem a cerca de 5% da energia total de entrada. Quanto às perdas através das cinzas, estas são mais difíceis de contabilizar uma vez que ainda não há muitos estudos acerca das características das cinzas resultantes da combustão de cama de aviário.

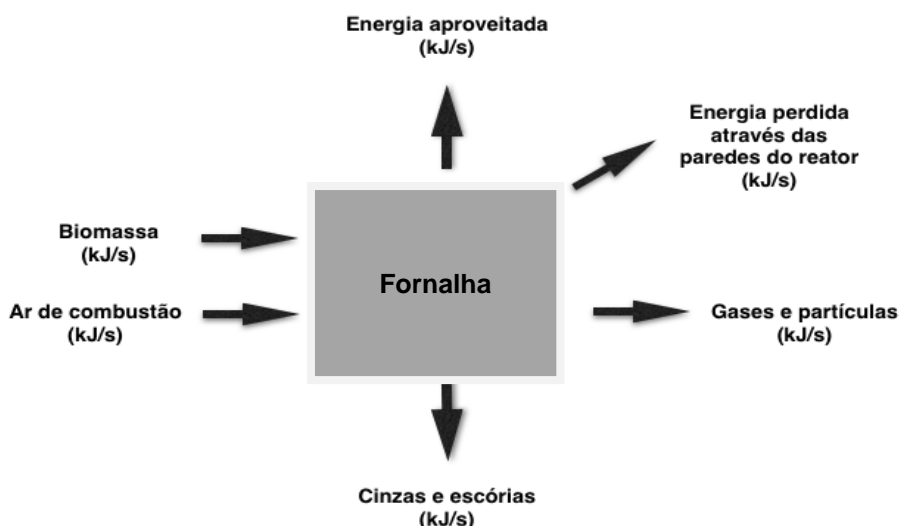


Figura 31 - Balanço de energia.

Tabela 16 - Valores médios utilizados para o balanço energético.

Parâmetros	Valores médios
Temperatura do vapor (°C)	180,0
Psaturação (bar)	9,3
Caudal mássico de vapor (kg/s)	4,2
Temperatura dos gases de exaustão	180,0
Caudal mássico de ar de combustão (kg/s)	10,8
Caudal mássico de biomassa (kg/s)	1,4
Temperatura do ar de combustão (°C)	44,0

#### 4.8. Problemas comuns na fornalha/caldeira

Os problemas mais comuns resultantes do funcionamento da fornalha/caldeira são apresentados na Tabela 17. Estes problemas são facilmente resolvidos graças à automatização das diferentes tarefas e além disso, o aviso relativo à situação a resolver aparece de imediato no monitor de controlo da caldeira. Após a resolução de cada uma destas situações é necessário voltar a rearmar as seguranças da caldeira, algo que é feito na sala de comando da caldeira. Existe em diversas partes da fábrica alarmes luminosos que dão informação relativas ao estado de funcionamento da caldeira. O sistema de alarme é constituído por três luzes: uma verde, uma amarela e uma vermelha. A verde está ativa quando a instalação de combustão está funcionar

com toda a normalidade. A amarela surge quando o problema a resolver tem alguma urgência (efetuar purga de fundo) e a vermelha surge quando o problema é grave e tem de ser resolvido o mais rápido possível (avarias nos parafusos sem fins, por exemplo). Por uma questão de segurança, a fornalha/caldeira desliga por pressão (para a alimentação de biomassa e ar de combustão) quando a pressão do vapor na fornalha/caldeira atinge os 14,55 bar.

Tabela 17 - Principais problemas resultantes do funcionamento da fornalha/caldeira.

<b>Principais problemas</b>	
1	Fornalha/caldeira desligou por pressão
2	Efetuar purga de fundo na caldeira
3	Disparo térmico do motor soprador do economizador
4	Avaria no sem fim de alimentação esquerdo/direito
5	Sensor rotativo de biomassa da tolva de alimentação à caldeira encravado
6	Alimentação a biomassa parou por temperatura baixa
7	Nível de segurança das bombas do desgasificador atingido
8	Falta de biomassa no silo
9	Disparo térmico do sem fim de transporte de cinzas ao contentor
10	Grelha superior em funcionamento e grelha inferior parada

Relativamente ao segundo alerta, este surge devido à necessidade de limpeza das tubagens de transporte de água, de modo a não haver acumulação de substâncias nas mesmas. O alerta para efetuar a purga de fundo é dado de seis em seis horas. A terceira situação ocorre devido à acumulação de partículas presentes nos gases ou também devido à temperatura elevada dos gases, que passam nesta zona. O quarto e quinto aviso estão ambos relacionados no sentido em que só surgem se o combustível possuir demasiados pedaços de esterco de galinha agregado à casca de arroz, ou quando se utiliza estilha. Estes pedaços podem forçar os parafusos sem fim, além de acumulação de sujidade nos mesmos e, numa situação mais grave, provocar a avaria dos motores que o acionam, devido à situação de esforço contínuo. O sexto alerta surge todos os sábados à noite. Quando termina a transformação da matéria-prima, já não é necessário mais produção de vapor, levando à paragem da instalação de combustão. Na situação sete, dada a segurança que está inerente ao funcionamento da caldeira e de todos os sistemas é normal surgir este tipo de alertas. Neste caso em concreto, este acontecimento dá-se quando a pressão no sistema é superior ou quando a bomba está muito tempo em funcionamento. O aviso oito surge quando a biomassa chega praticamente ao fim no silo. Tal situação deve-se à não perceção dos funcionários, levando a que não haja a reposição de biomassa atempadamente, de modo a restabelecer o nível da mesma no silo. Isto pode trazer problemas, principalmente quando se tem a caldeira em pleno funcionamento. No caso do aviso nove, o motivo de este surgir deve-se ao esforço no motor do sem fim, levando a um

sobreaquecimento do mesmo. Muitas das vezes este alerta é ativado pelos operadores, quando estes necessitam de esvaziar o contentor das cinzas. Dado que as grelhas são ativadas através do painel de controlo da caldeira, a situação 10 surge quando tal ativação não é feita, ou quando há uma falha no motor de acionamento da grelha.



## **5. Sugestões para melhoria das condições de operação da instalação de combustão e respetiva produção de vapor**

Neste capítulo é feita uma abordagem adicional em relação a alguns aspetos identificados, de forma melhorar o funcionamento/operação da instalação de combustão.

### **5.1. Combustível**

É essencial que a cama de aviário possua um teor de humidade o mais uniforme possível de modo a melhorar as temperaturas no interior da caldeira. É importante determinar de forma regular qual o teor de humidade, seja este procedimento feito na fábrica ou no local onde é extraído o combustível. Ao saber o conteúdo de humidade podemos também controlar melhor a adição de estilha à cama de aviário. Uma outra questão tem a ver com a formação de sílica. Um teor de humidade muito baixo, faz disparar as temperaturas da fornalha, induzindo a uma formação mais intensa de sílica no corpo da caldeira. Da observação verificou-se que a formação de sílica é mais frequente quando se possui temperaturas superiores a 900 - 1000°C durante longos períodos de tempo.

#### **5.1.1. Limpeza regular dos sem fins de transporte de combustível à caldeira**

Quando o combustível é mais húmido, é habitual este aderir mais facilmente à superfície dos parafusos sem-fim. Verifica-se acumulação tanto no parafuso sem fim de extração (instalado na horizontal, como nos parafusos sem fim que possuem uma inclinação mais significativa. Este aspeto apresenta consequências nefastas ao correto funcionamento da caldeira, pois quando temos incrustações nos sem fins, a quantidade de material que estes são capazes de transportar passa a ser mais reduzida. Consequentemente há uma menor quantidade de combustível a chegar à caldeira, prejudicando o desempenho da mesma. Na Figura 32 é visível a deposição de material no sem fim de extração.

Verifica-se uma degradação do próprio sistema de transporte, através do aumento do desgaste dos parafusos sem fim e esforço dos motores de acionamento dos mesmos. Nesta situação referida anteriormente, o parafuso sem fim quase nunca efetua paragens, levando a uma redução significativa do seu tempo de vida e dos motores envolvidos no acionamento.

Para minimizar este problema sugere-se uma limpeza periódica dos sem-fins com estilha ou ser o próprio operador a remover as incrustações, quando os parafusos sem fim não se encontram em movimento. No entanto, estas incrustações também acabam por sair quando ficam mais secas. A questão da adição de estilha deve ser acautelada, uma vez que se verificou que quando se adiciona estilha juntamente com a cama de aviário, apenas se conseguia remover uma parte pouco significativa do material que se encontra colado ao parafuso sem fim.



Figura 32 - Pormenor da deposição de sujidade no parafuso sem fim de extração de biomassa.

No entanto, quando temos só estilha a circular, a remoção de incrustações é mais eficiente, mas não completa. Uma outra situação que pode minorar o problema da acumulação de cama de aviário no parafuso sem fim tem a ver com a instalação de um parafuso sem-fim com umas “hélices” maiores, sendo também necessário o alargamento das tolvas onde se encontram os parafusos sem fins. Este aspeto permite que mesmo que haja acumulação, garantir uma alimentação regular à fornalha/caldeira.

## **5.2. Modificação do sistema de alimentação**

Um aspeto em estudo e em vias de ser aplicado tem a ver com a alteração/melhoria do sistema de alimentação. Pretende-se reduzir a inclinação do sistema, instalar uns parafusos sem fim com diâmetros de hélices maiores e diminuir a distância percorrida pela biomassa até à fornalha. Estas alterações visam em aumentar o caudal fornecido à fornalha industrial, impedir a paragem da fornalha em caso de avaria de algum dos motores de acionamento dos parafusos sem fim ou quando é necessário efetuar a troca de algum dos parafusos sem fim, minimizar as incrustações e o retrocesso da biomassa durante o transporte.

## **5.3. Distribuição das temperaturas ao longo da fornalha**

Relativamente às temperaturas é importante que estas se encontrem o mais estabilizadas possível de modo a:

- maximizar a produção de vapor;
- minimizar a formação de sílica;
- reduzir os choques térmicos no interior da fornalha;

- evitar a fusão das cinzas no interior da fornalha.

#### **5.4. Otimização do funcionamento da fábrica/regime de operação da instalação**

As situações de pára-arranca (desliga por pressão) da fornalha/caldeira, frequentes quando há pouco consumo de vapor pela fábrica são um dos principais problemas que altera de forma negativa o funcionamento da fornalha. Em determinadas alturas, devido a problemas nas linhas de transformação, a fornalha esteve muito tempo na já referida situação de desligar por pressão (uma vez que não havia consumo de vapor). Esta situação provocou a formação de um grande bloco de material com algum material por queimar que acabou por entupir quase na totalidade a zona de saída das cinzas para o redler. Na situação de desligar por pressão, as grelhas móveis param de funcionar (assim como a alimentação e a insuflação de ar), levando a que a biomassa em combustão se acumule na grelha, traduzindo-se numa desvantagem quando a biomassa está muito húmida. Foi necessário proceder à desintegração do bloco, para que o material resultante da desintegração seguisse para o redler.

Um outro aspeto negativo tem a ver com a formação de pedra no cone, por onde sai uma parte das cinzas para o redler. Para minimizar esta situação, optou-se por isolar o cone, reduzindo as infiltrações de ar e no futuro pretende-se fazer o alargamento desse mesmo cone. Como a fornalha se encontra em depressão, estas infiltrações de ar faziam com que as partículas se acumulassem na zona superior da fornalha, acabando por condensar e formar pedra.

É preciso ter em conta que a fábrica necessita de vapor quando há matéria-prima para transformar. Poderia-se ter um melhor funcionamento da caldeira durante este período se fosse possível uma negociação com os vários centros de abate de onde chega a matéria-prima. Se a chegada de matéria-prima for mais uniforme ao longo do dia, as linhas de transformação vão estar menos tempo a funcionar de forma intermitente, levando a uma uniformização do consumo de vapor. Isto teria um impacto significativo na diminuição de desligar por pressão da fornalha/caldeira, estabilizando a produção de vapor.

Uma outra situação tem a ver com o período de laboração da fábrica. Se a fábrica operar de forma continua, inclusive ao fim de semana, todos os problemas relacionados com paragens da instalação de combustão serão minimizados.

Em suma, um funcionamento em contínuo das linhas de transformação de matéria-prima minimiza as paragens da instalação de combustão, maximizando a produção de vapor.

#### **5.5. Aumento da pressão do vapor na fornalha/caldeira**

Como já referido, a pressão máxima que o vapor atinge na fornalha/caldeira é de 14,55 bar, entrando no modo de desligar por pressão a partir desse valor, por motivos de segurança (dado que as válvulas só estão preparadas para aguentar até uma pressão de 16 bar). Uma outra questão tem a ver com a altura de chama, que como se verifica na Figura 33, diminui consideravelmente quando a caldeira desliga por pressão, reduzindo a pressão do vapor que sai da caldeira.



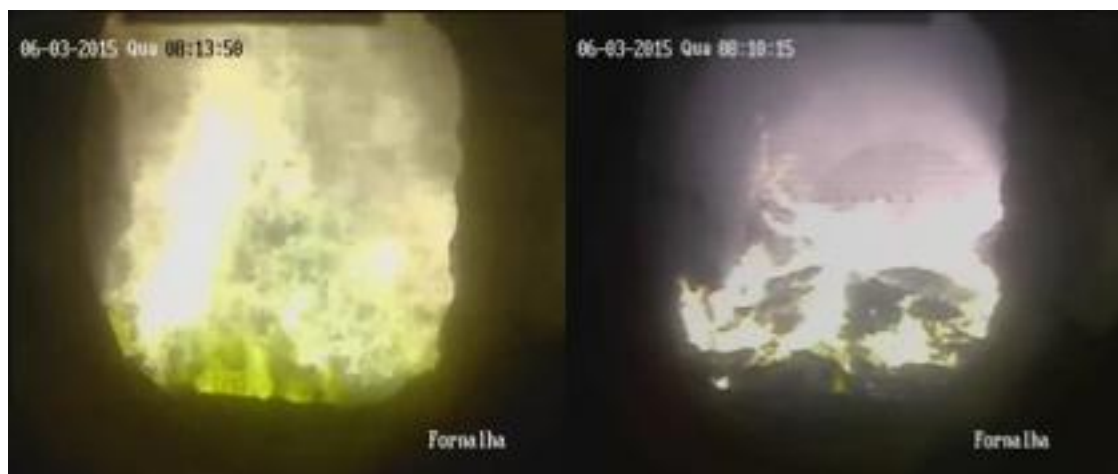


Figura 33 - Altura de chama (à esquerda na situação de desligar por pressão e à direita em funcionamento normal).

No entanto a fornalha/caldeira foi concebida para operar até um máximo de 40 bar, uma vez que no futuro pretende-se fazer a expansão para a produção de energia elétrica. No entanto, este aumento de pressão levaria a temperaturas mais elevadas no interior da fornalha e além disso, o vapor produzido teria maior temperatura. Haveria também um aumento do consumo de combustível pela instalação de combustão. Dado que é necessário vapor com uma temperatura limitada para o processo produtivo, é importante perceber até que ponto o aumento de pressão pode ser benéfico e se é possível para esta situação.

#### **5.6. Instalação de um sistema de tratamento de efluentes gasosos mais eficiente**

O sistema de tratamento dos gases está subdimensionado (nomeadamente o ciclone). Este apresenta-se como não sendo a melhor solução para o tratamento de gases e partículas resultantes da combustão. Dado que a instalação de combustão se encontra em funcionamento há pouco tempo, verifica-se que há uma grande deposição de partículas na parte inferior da tubagem de circulação dos gases de exaustão, sendo este aspeto evidenciado na Figura 34.

É de salientar que na tubagem, imediatamente antes do ventilador de extração, havia corrosão moderada devido à condensação que ocorre durante os períodos de paragem mais prolongados e também em parte pela presença, em alguns momentos, de  $\text{SO}_2$  nos gases de combustão. A reação que ocorre entre a água e o dióxido de enxofre origina então a substância que vai provocar a corrosão da tubagem.

Dos componentes integrantes do sistema de tratamento de gases, o ciclone é aquele que evidencia mais problemas, quer seja pelo entupimento com pedaços de ferrugem resultantes da corrosão e partículas presentes nos gases. Estes problemas são motivados em grande parte pela incapacidade na separação das partículas presentes nos gases, ou seja, verifica-se que este equipamento não está devidamente dimensionado para a instalação de combustão em estudo. Tendo em conta estes

Monitorização das condições de operação de uma fornalha industrial a biomassa

---

problemas, nomeadamente no que respeita à elevada quantidade de partículas, a empresa decidiu avançar com a implementação de um sistema de multiclones mais eficiente.

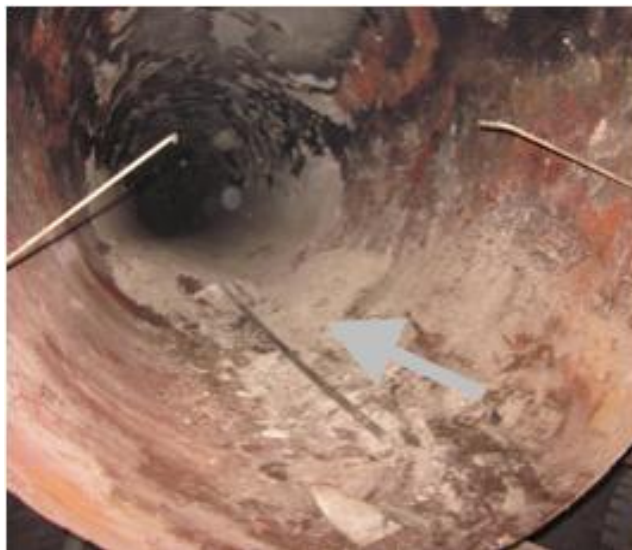


Figura 34 - Pormenor da deposição de partículas na tubagem de transporte dos gases de exaustão.

### **5.7. Diminuição da extensão do percurso efetuado pelo vapor**

Durante a permanência na fábrica, verificou-se que o vapor produzido pela caldeira tinha de percorrer uma longa distância até ser utilizado nas linhas de transformação. Se vapor chegar a uma boa temperatura à linha, não são necessárias tantas toneladas de vapor. Dado que o vapor é indispensável ao processo, este facto assume extrema relevância.

Numa primeira fase foram medidas a temperatura do vapor em diferentes pontos da tubagem, desde o coletor até em antes de este entrar nos equipamentos das linhas de transformação.

A Figura 34 representa o percurso efetuado pelo vapor (representado pelas setas), além dos vários pontos de medição considerados para obtenção dos valores de temperatura, numerados de 1 a 6.

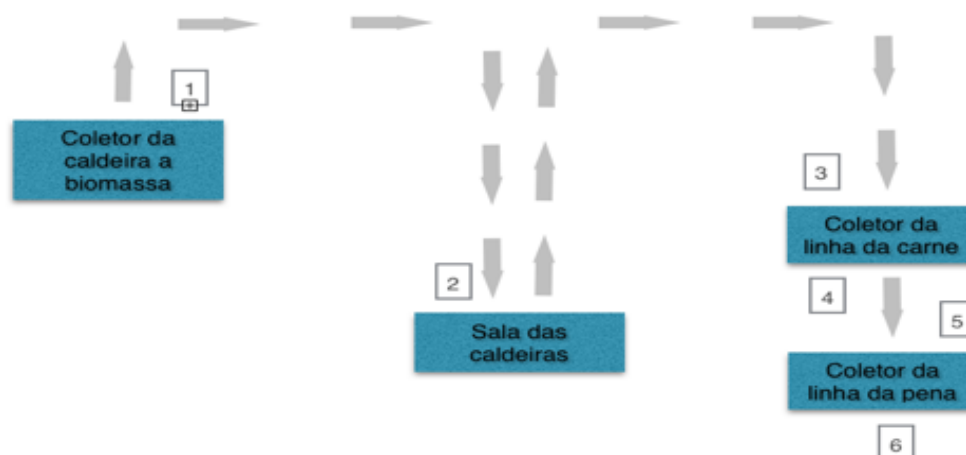


Figura 35 - Percurso efetuado pelo vapor (indicado pelas setas), estando os pontos de 1 a 6 referenciados na Tabela 18.

Tabela 18 - Pontos de medição de temperatura e respetivos valores obtidos.

Zonas de medição	Temperaturas (°C)
À saída do coletor, junto à caldeira (tubo não isolado) – ponto 1	214,3
Chegada ao coletor na sala das caldeiras – ponto 2	209,2
Chegada ao coletor da linha da carne - ponto 3	203,4
Saída do coletor da linha da carne - ponto 4	198,4
Chegada ao coletor da linha da pena – ponto 5	194,0
Saída do coletor da linha da pena – ponto 6	187,6

Verifica-se que há uma diminuição de cerca de 11°C na temperatura até ao vapor chegar ao coletor da linha da carne, pelo que se trata de uma perda significativa. Ainda no que toca à questão das perdas, procedeu-se à determinação da perda de calor por cada metro de tubo na tubagem de transporte de vapor. Para tal recorreu-se aos processos de transferência de calor em tubagens e adaptou-se à situação em causa. Nesta situação tem-se vapor a uma temperatura média de 180°C a circular numa tubagem de aço, com diâmetros interiores e exteriores de 26 e 26,5 centímetros. A envolver a tubagem, encontra-se uma camada de isolamento de lã de vidro que possui uma espessura de 3,5 centímetros. O calor é perdido para as redondezas a uma temperatura média de 40°C por convecção (Incropera *et al*, 2008). Na Tabela 19 encontram-se os restantes parâmetros para a resolução desta questão e os resultados finais.

Tabela 19 – Proposta para solução do problema.

Parâmetros	Valores	
$L_{\text{tubagem}}$ (m)	190	100
$K_{\text{aço}}$ (W/(m.°C))	80	80
$K_{\text{lã de vidro}}$ (W/(m.°C))	0,05	0,05
$h_{\text{interno}}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))	60	60
$h_{\text{externo}}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))	18	18
$R_{\text{interior}}$ (°C/W)	$8,0 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-4}$
$R_{\text{exterior}}$ (°C/W)	$3,0 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$
$R_1$ (°C/W)	$2,0 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-7}$
$R_2$ (°C/W)	$3,9 \times 10^{-3}$	$7,5 \times 10^{-3}$
$R_3$ (°C/W)	$2,0 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-8}$
$R_{\text{total}}$ (°C/W)	$4,3 \times 10^{-3}$	$8,2 \times 10^{-3}$
$Q$ (W)	$3,3 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$

O procedimento adotado para o cálculo das variáveis mencionadas na tabela foi o seguinte: determinou-se a resistência térmica associada ao escoamento interno e ao escoamento externo. Posteriormente calculou-se a resistência associada a cada camada de material e seguidamente determinou-se a resistência total, que é a somatório de todas as resistências. Por fim, através do quociente entre a diferença de temperatura (a do vapor menos a da redondeza) e a resistência total, determinou-se a perda total (Incropera *et al*, 2008).

De modo a reduzir esta perda sugere-se que o vapor, em vez de ir à casa das caldeiras e só depois ser direcionado para as linhas, passe a seguir diretamente do coletor da caldeira até ao coletor da linha da carne e posteriormente para o da linha da pena. Nesta proposta reduzimos dos atuais 190 metros para os 100 metros, reduzindo a perda dos atuais 33 kW<sub>th</sub> para os 17 kW<sub>th</sub>, traduzindo-se num aumento da temperatura de chegada do vapor.

## 5.8. Formação dos operadores

Durante a permanência na empresa constatou-se que a maioria dos trabalhadores não sabe operar corretamente com a instalação de combustão. Verificou-se que numa grande parte das situações alguns operadores tinham dificuldade em resolver ou não sabiam como resolver os problemas que iam surgindo. É importante integrar todos os operadores para minimizar ou evitar problemas que vão surgindo com a instalação de combustão, dando-lhes alguma formação para o efeito.



## 6. Conclusões

A combustão em leito fixo é considerada um processo importante para a conversão de energética de biomassa com teores de humidade elevados. No entanto, o tipo de biomassa disponível, bem como as condições operatórias são aspetos determinantes para a obtenção de um bom desempenho por parte desta tecnologia.

Estudou-se um tipo de biomassa resultante da criação de aves, mais propriamente a cama de aviário. Este tipo de biomassa veio diretamente dos centros de criação de aves para ser queimado na instalação de combustão, sendo armazenado ao abrigo das condições atmosféricas e muitas vezes armazenado em pilha.

A secagem do combustível ao abrigo das condições atmosféricas mostrou ser um grande benefício para reduzir o teor de humidade do combustível, principalmente quando a cama de aviário apresenta um conteúdo elevado de humidade. No entanto, verificou-se degradação biológica do combustível quando armazenado em pilha de grandes dimensões. Além disso, combustível com elevado teor de humidade provocou uma redução da alimentação à caldeira, tendo como consequência a diminuição da pressão do vapor na caldeira e redução da produção de vapor. A redução da alimentação deveu-se a problemas relacionados com paragens mais frequentes dos parafusos sem fim de transporte da biomassa até à fornalha e acumulação excessiva de biomassa nos parafusos sem fim.

Ainda relativamente ao combustível, é importante que este seja o mais homogéneo possível, de modo a que não haja tanta variação ao nível das emissões de gases.

Em relação à quantidade de cinzas produzidas, constatou-se que ao queimar somente cama de aviário obtém-se uma quantidade superior de cinzas, comparativamente a queimar uma mistura de cama de aviário com estilha. Quanto às características dessas cinzas, é de destacar a presença de diversos metais pesados, ainda que alguns deles em concentrações muito reduzidas. Mostra-se assim a importância de ter com o manuseamento das cinzas produzidas. Quanto às cinzas resultantes da mistura de cama de aviário com estilha, não foi possível obter uma análise em tempo oportuno para incluir no trabalho.

No que respeita ao ar fornecido à caldeira, verifica-se que há uma maior quantidade de ar a ser injetado nas primeiras zonas da fornalha, de modo a que a haja uma boa secagem da biomassa e para que a queima se dê nas devidas zonas da fornalha. Dado que o ar insuflado é controlado pelo operador, verifica-se uma grande melhoria do processo de combustão quando esse caudal é ajustado de acordo com o tipo de biomassa admitido à fornalha/caldeira. É também importante garantir uma razão estequiométrica adequada durante a combustão. Constatou-se que muitas das vezes, quando a razão estequiométrica era mais baixa, obtia-se menor concentração de alguns poluentes, como o CO evidenciando uma combustão mais completa.

Um outro parâmetro é o ajuste da velocidade das duas grelhas móveis presentes no interior da fornalha. De facto são estas grelhas que permitem uma queima mais eficiente do combustível ao longo da fornalha. Verificou-se que para um combustível mais húmido é importante diminuir a velocidade das grelhas, de modo a aumentar o seu tempo de residência na fornalha. Tal facto permite minimizar a formação de inqueimados nas cinzas, resultante de uma queima mais eficiente.

Um outro aspeto importante resultante da variação da velocidade das grelhas tem a ver com a temperatura medida na última zona da fornalha. Ao haver uma queima mais

uniforme ao longo das grelhas, há uma distribuição mais eficiente das temperaturas ao longo da fornalha, evitando a fusão das cinzas.

Em suma, a realização deste estágio possibilitou o aprofundamento e consolidação de conhecimentos a muitos níveis, nomeadamente acerca de fornalhas para queima de biomassa e respetivas condições de operação. Foi uma experiência enriquecedora que permitiu não só tudo aquilo que já foi referido anteriormente, como também possibilitou bases importantes para uma boa integração na vida profissional.

## Bibliografia

- International Energy Agency (IEA). 2009. World Energy Outlook.
- Demirbas, A. 2004. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science* , 31, 171-192.
- Costa, M. 2005. Biomassa - Características e utilização. Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa.
- Dermibas, A. 2004. Combustion characteritics of diferent biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 219-230 .
- El-Mahallawy, F. 2004. Fundamentals and Technology of Combustion. Elsevier .
- Golçalves, H. J. 2002. Uma contribuição para os objetivos de política energética e ambiental. Agência para a energia.
- Hirayama, Y. 2009. Use of Biomass in Industrial Boilers. TechnoSoft Co, Ltd .
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P. 2008. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa (sexta edição).
- Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J. & Spliethoff, H. 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology* , 90, 21-50.
- Koorneef, J., Junginger, M., Faaij, A. 2007. Development of fluized bed combustion - An overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science* , 33, 19-55.
- Loo, S. V., Koppejan, J. 2008. The handbook of Biomass Combustion & Co-firing. London: Earthscan, cop.
- Obernberger, I. 1998. Decentralized biomass combustion - State of art and future development. *Biomass and Bioenergy*, 14, 33-56.
- Portaria nº675/2009, de 23 de junho.
- Portaria nº674/2009, de 23 de junho.
- Quaak, P. K., Knoef, H., Stassen, H. 1999. Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies. The International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., Mekhilef, S. 2011. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 15, 2262-2289.
- Sanches, A. 2007. Aplicação do processo de compostagem na estabilização de resíduo de aviário. Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Aveiro.
- Silva, A. R. 2009. Simulação da combustão de biomassa em leito fluidizado. Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento , Aveiro.
- Tarelho, L. 2014. Conversão de energias renováveis. In Slides sobre biomassa.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913-933.
- White, E. M. 2010. Woody Biomass for Bioenergy and Biofuels in the United States - A Briefing Paper. Oregon State University, College of Forestry. 1-36.





## **ANEXOS**

## Anexo 1 - Determinação do teor de inqueimados

(Adaptado da norma CEN/TS 14775:2004)

### Material:

- Cadinhos de porcelana;
- Mufla;
- Balança com sensibilidade de 0,1 mg;
- Excicador, com e sem sílica;
- Tijolo ou grelha metálica.

### Procedimento experimental:

Procedimento válido depois de se ter efetuado a determinação do teor de humidade, feito de acordo com a norma CEN/TS 14774-3:2004.

- Calcinar os cadinhos, devidamente identificados, colocando-os numa mufla a uma temperatura de  $(550 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C})$ , durante 60 minutos;
- Retirar os cadinhos da mufla e deixar arrefecer e deixar arrefecer no tijolo durante 5 a 10 minutos;
- Decorrido o tempo de arrefecimento, efetuar a pesagem e registo da massa ( $m_1$ );
- Colocar cerca de 2 mg de amostra em cada cadinho, ocupando toda a base de modo uniforme, pesar e registar o valor da massa ( $m_2$ ). Adotar este procedimento para todas as amostras;
- Colocar os cadinhos na mufla fria;
- Aumentar a temperatura da mufla até aos  $250^{\circ}\text{C}$ , com incrementos de  $10^{\circ}\text{C}$  por minuto, mantendo essa temperatura durante cerca de uma hora;
- Continuar o aumento da temperatura da mufla até aos  $550^{\circ}\text{C}$ , com incrementos de  $10^{\circ}\text{C}$  por minuto e manter esta temperatura ao longo de duas horas;
- Retirar os cadinhos da mufla e deixar arrefecer no tijolo durante 5 a 10 minutos, transferindo-os de seguida para excicador sem sílica, deixando-os arrefecer até à temperatura ambiente;
- Pesar os cadinhos e registar o seu valor ( $m_3$ ).
- Determinar o teor de voláteis através da Equação A.1.

### Procedimento de cálculo:

O conteúdo de inqueimados em base seca, ( $A_d$ ) da amostra de cinzas, deve ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

Onde,

$m_1$  – massa do cadinho vazio (g);

$m_2$  – massa do cadinho mais amostra antes de ir à mufla, em (g bs);

$m_3$  – massa do cadinho mais amostra depois de ir à mufla, em (g bs)